

建設技術研究開発助成制度

エネルギー自律型都市代謝システムの開発を通じた生活環境の改善

研究代表者：繪内正道（北海道大学大学院工学研究科空間性能システム専攻 教授）

1. はじめに

生活環境の改善を目的に、自然エネルギーと燃料電池等の統合的利用により、徹底した省エネルギー、自然エネルギー利用を図った、エネルギー自律型都市代謝システム技術の実用化を目指す。

低負荷型システムの実現が容易な外断熱建物をベースに、1) 熱負荷計算法のアカデミックスタンダード化、2) 外断熱建物における高効率な水系空調システム、3) 建物の基礎杭を利用した地中熱源・蓄熱ハイブリッド空調システム、4) 自然エネルギーと燃料電池の統合最適利用システム、5) 温熱および空気環境の予測評価・制御システムの研究開発を進め、暖冷房の省エネルギー化（50%削減）を達成しながら、節約や我慢を強いることのない快適で良好な生活空間の創造を実現する。

本課題の特色・独創性は、我々を取り巻く建築・都市に対する徹底した低負荷をベースに、地域性に基づいた新たな計画理念やこれから望まれるライフスタイルをも包含した所にある。建築の基礎杭を利用した空調システム、自然エネルギーと燃料電池等を含めた統合最適利用システム、予測評価・制御システムは地域特性を新たな計画理念に取り込むための比類のない革新的ツールとなる。

2. 熱負荷計算法のアカデミックスタンダード化

2.1 研究・技術開発の目的

平成16年3月、空気調和・衛生工学会は『高断熱建物における熱負荷計算法調査研究』に関する最終報告書（松尾委員会）を刊行した。その報告書の主たる主題は、次に示す、①空調設備計画の基本である熱負荷計算の大部分は、エネルギーが潤沢であった時代の手法を踏襲しているが、今日的な観点からの再吟味も十分に意味がある。②高断熱建築物において躯体蓄熱を考慮した場合、グリーン化技術に対する熱負荷計算手法を再検討する余地がある。③高断熱建物における熱負荷計算法に関する諸課題を調査・検討することは、今後の省エネルギー建築に対する社会的要請に応

え、かつ地球環境時代に相応しい今後の空調負荷計算法のあり方を策定する観点から重要な課題と考えられる、にあった。

本報告は、上述の様に総括された調査研究委員会における問題意識を背景に、床暖冷房を計画した高断熱建物の数値解析結果から、室温変動の許容及び簡易予測制御を採用した場合の、予熱負荷や熱機器容量の合理的な算定に関する試案を取り纏め、平均負荷計算法のスタンダード化の一助とするものである。

2.2 研究・技術開発の内容と成果

(1) 10時間昼間運転の高断熱建物で、執務終了後に予熱を開始し、翌朝の執務開始まで運転すると、14時間が予熱時間となるが、水系の搬送動力費は空気系よりも少額で済む。また、土日に運転を停止しても、室温低下（上昇）幅が狭まり、停止の利得額は少ない。夜間の暖冷房運転による出火や防災上の問題を指摘する設備技術者がいる一方で、多くの高断熱建物では小設備機器容量を活かし、運転管理責任者なしで自動運転を行っている現実もある。それ故、土日運休問題の解決は、平均負荷計算法の主旨に沿った設備機器容量の7/5増問題に帰着させるよりも、予熱時間の増と捉えた連続運転（周期的定常）とする環境計画の方が、今後の設備容量の算定にとって重要になってくる。

(2) 室温変動の許容を前提とした簡易予測制御を適用した場合、暖房期においては、連続運転や夜間運転の様な連続相当運転が、また冷房期においては、対照的に間欠運転や夜間運転の様な間欠相当運転がより効果的であることを示した。ビル管法よりも危険側の高湿度条件を想定し、床冷房時の床表面結露を検討したが、夏期に冷涼な地域においては、床冷却による結露の危険性は極めて低い。更に、吸放熱の熱流量の大小関係と熱流の方向から、主たる吸放熱部位を整理すると、躯体の蓄熱・蓄冷効果は、外壁躯体よりも床スラブの方がはるかに有効に機能していることを明らかにした。

3. 外断熱建物における高効率な水系空調システム

3.1 研究・技術開発の目的

従来、事業用建物で用いられている空調方式は空気を熱媒とした方式が多く、熱搬送に多くのエネルギーを消費していた。本研究開発では、IT化が進んだ事業用建物の空調用エネルギー消費量の大幅な削減に資するため、搬送動力が必要なファンコイルユニットではなく、自然対流および放射熱伝達を利用した天井設置カスケード型冷水循環方式を用い高効率空調システムの実用化を目指す。また、冬期、室内で発生する暖房と冷房の同時発生にともなう混合損失の成因を明確にし、インテリジェントオフィスを対象にした高効率空調システムの実現性を検証する。

3.2 研究・技術開発の内容と成果

室内の発熱密度が高いオフィスを想定した空調方式への適用を主眼に、天井に自然通風型コイルを設置した空調方式の可能性について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

(1) 天井に自然通風型コイルを設置し、送風機による熱搬送を必要最小限にとどめる空調方式を提案した。また、この方式では外気処理やペリメータ処理のために設置したAHUやFCUで使用した冷水を再度利用することが可能となり、冷水のカスケード利用が可能となる。試算の結果、約36～40%の省エネルギー効果を確認した。

(2) 煙突効果を促進するチムニー型コイル、天井懐に空気を多数の孔から室内に吹き出す多孔型コイルなど高負荷に対応可能な試作冷却コイルの評価を行い、設計に利用可能な冷却能力の実験式を作成した。さらに、シミュレーションの結果、空気系空調方式よりも水系空調方式の方がより省エネルギーであり、発熱密度の高い建物において、エネルギー消費量の削減効果は大きい。水系の空調方式に間接外気冷房を導入すると、さらなる省エネルギー化が可能であることを示した。

(3) 部屋の諸要素(奥行き、負荷のばらつき、窓の断熱性能)が室温分布に与える影響について調べ、ゾーニングの必要性について検討を行い、部屋の諸要素が既知の場合、室温の標準偏差を算出可能にした。

(4) PMVを用いて、室温の標準偏差の許容範囲を求め、実験結果からゾーニングの可否について判

断した。また、窓面の断熱性能、部屋の奥行きが変化した場合にそれらが室温分布に与える影響について考察した。さらに、熱負荷の分布・窓の断熱性能・部屋の形状から、ゾーニングの可否を判断する手法を提示した。

4. 建物の基礎杭を利用した地中熱源・蓄熱ハイブリッド空調システム

4.1 研究・技術開発の目的

我が国の都市は扇状地に形成されていることが多く、このような地域で地中熱を利用する場合には、地下水流動を考慮した短期および中長期の地盤熱特性を把握することが重要となる。本研究では、地下水流動環境における地盤熱特性を実験的に明らかにするとともに、最終的には地盤を複合的に利用したCO₂排出量50%の省エネルギー空調システムを構築することを目的としている。

4.2 研究・技術開発の内容と成果

(1) はじめに、縦2.0m×横4.5m×高さ3.0mの地下水模擬実験装置において、地下水流動による採放熱量の増大効果を定量的に明らかにした。続いて、模擬地下水流れを有する14Lの砂層タンクにサーマルプローブを挿入し、連続加熱を行った場合の砂層温度の応答を測定した。その結果、温度応答は移動線熱源温度応答理論を用いた計算値によって概ね再現され、この理論が温度応答の計算および地下水流速の推定に有効であることを示した。一方、この理論は高速計算を行うのに有効ではあるが、理論上熱源の口径が無限小となるため、実際には地中熱交換器の口径の増大により、計算誤差が大きくなる恐れがある。そこで本研究では、地下水流れ環境に位置する円筒熱源に対する温度応答を、差分法を用いた数値計算により別途算出し、移動線熱源の温度応答との比較から補正係数を導く方法を採用し、複数の地中熱交換器に対しても短時間での計算が可能なる手法を見出した。

(2) さらに、下水処理システムにおける処理水を地下に涵養し、その排熱を下流で汲み上げることを想定した、新たな都市排熱活用システムを提案した。地中熱ヒートポンプと同じ熱量を灯油ボイラやガスボイラで発生させる場合、地中熱ヒートポンプシステムにおけるCO₂排出削減率はそれぞれ

れ 53%、37%になることを示し、本システムによる高い導入効果を明らかにした。

5. 自然エネルギーと燃料電池の統合最適利用システム

5.1 研究・技術開発の目的

健康で持続可能な生活環境をつくることを目的として、その基盤であるエネルギーシステム（設備）の自律化を指向した代謝システムを提案する。具体的には、自然エネルギーと燃料電池などの設備を統合最適利用した近未来型暖冷房・空調工学を構築するとともに、環境低負荷型都市の創成に係わるエネルギーシステムについて検討する。

5.2 研究・技術開発の内容と成果

自然エネルギーと燃料電池を活用した住宅用複合型エネルギーシステムを開発した。

- (1) まず、固体高分子形燃料電池の発電特性と排熱回収特性に関する実験を行った結果、直流端発電熱効率、排熱回収熱効率は、それぞれ 40%を越える極めて高い値を示した。次いで、簡易指標を導入した自然エネルギーとのハイブリッドシステム最適運転・制御シミュレータの開発を行った。
- (2) 本シミュレータを用い、戸建て住宅における燃料電池最適運転方法の検討を行った結果、電主熱従連続運転によって、より高い省エネルギー性を実現できることを確認した。また、解析結果に新たな条件を加えることで、実機による実施可能な運転方法の算出を行った。
- (3) 実規模実証実験を行った結果、電主熱従連続運転に対し、熱損失・一次エネルギー消費量を削減することが可能となり、特に熱需要の小さい夏期において、燃料電池のより高い省エネルギー性を発揮できる運転を実現した。また、自然エネルギーを利用したヒートポンプと燃料電池のハイブリッドシステムを構築し、従来方式に対して 40%程度の省エネルギー性を実現した。
- (4) 燃料電池と再生可能エネルギーを複合利用するための水素エネルギーシステムとして、水素吸蔵合金を取り上げ、水素の吸蔵・放出実験と住宅用水素貯蔵材料としての適性評価を行った結果、吸熱・放熱流量は約 1W 程度となり、実規模での高い導入可能性が示唆される結果を得た。

6. 温熱環境と空気環境の予測評価・制御システムの開発

6.1 研究・技術開発の目的

21 世紀は地球環境が求める省エネルギー性と居住環境の本来の目的である健康増進性といういわば相反した命題の許容解を求めている。その一つの手段であるエネルギー自律型都市代謝システムの確立のために、人間の生理心理特性の評価をも含んだ温熱環境と空気環境の予測評価・制御システムの構築を目指す。

これまでは不均一かつ非定常な温熱環境にも適用可能な生体内温度予測モデルを開発し、成人男性を中心としてその精度を向上させてきたが、近年の女性労働者の増加や高齢者人口の増加に伴い、今後は、女性や高齢者に配慮した空間設計の重要性が増すと考えられる。本研究では、加齢によって機能変化が予想される発汗機能に着目し、高齢者および女性への本システムの適用可能性の検討ならびに多様な温熱環境の評価を通して、温熱環境の予測・制御システムの精度向上を目指す。

6.2 研究・技術開発の内容と成果

- (1) 室内空気汚染物質による健康への影響を検討するためには、事前の室内の空気環境の総合的な評価が重要と考えた。そこで、はじめに単室および多数室のコンパートメントモデルに基づき簡便なシミュレーションプログラムを開発した。空気質の中の自然放射性物質を主対象にした予測プログラムが有効であることを示した。
- (2) 次に、濃度分布モデルに基づくプログラムの開発に関連し、基礎方程式の離散化および計算アルゴリズム概要についてまとめた。ここで開発された室内空気質の濃度分布予測ためのプログラムの特徴は、作成過程の高効率化および作成後の活用性の向上を考え 3 次元流体汎用解析システムの導入を図ったことにある。これらの温熱環境と空気環境の予測評価・制御システムを活用することにより、省エネルギー性と健康増進性の両者を満足する持続可能な生活環境の確保がより確実になることを示した。

7. 今後の展開

7.1 住宅・社会資本整備の分野、また国民生活、

経済活動に及ぼす具体的な貢献内容

京都議定書の発効後、産学官の連携による、省エネルギーに向けた一層の努力が求められるようになってきた。節約や我慢を強いることのない快適で良好な生活環境の創造こそがその解の一つと考える、建物の高断熱高气密化と自然エネルギーの有効利用、建築と設備を総合的に一元化したハイブリッド型システムの最適化は、低負荷型システムの確立と実現が鍵になってくる。

例えば、既築建物の外断熱改修は、省エネルギーと快適で良好な生活環境の提供を容易にするが、それはまた、地道な住宅・社会資本の整備に直結してくる重要な課題とすることができる。自律型都市代謝システムとして、都市・建築の低負荷が実現すると、従前、諸施設的环境保持のために必要とされてきた民生用エネルギーの大部分は、我が国の生命線である生産活動や輸出産業の振興へと振り向けることが可能になってくるのである。

自然エネルギーと燃料電池の統合的利用を目指し、エクセルギーの高いエネルギーをそのまま暖冷房エネルギーとして利用する愚は可能な限り避けようと言う研究・開発の視点は、地域の国民生活、経済活動に及ぼす貢献に対し大なるものがあると考えられる。

7.2 実用化への見通し

高断熱建物の水搬送による躯体蓄熱システムは、2006年夏に竣工予定のオフィス建物に導入する予定である。また、平成18年度開学の札幌市立大学新校舎に導入された、鋼管基礎杭利用によるGSHPシステムは、地下水流れの影響を加味したシステムとして再評価される段階にある。さらに、平成20年度開院予定の船橋市立リハビリテーション病院（仮称）におけるPHC杭利用GSHP701システム（40本以上のPHC杭を利用したGSHPシステム）において、地下水流れの影響を加味した場合のシステムの評価が行われている。一方、自然エネルギーとコージェネレーションを活用した複合システムは、札幌市内の公共施設に導入され、2006年より稼働している。また、2006年内に戸建て住宅用システムとして十件程度展開予定である。

8. 研究成果（査読付き論文）

- 1) 環境系論文集、No.599、寒冷地における高断熱建物の室内温熱環境と暖房エネルギー消費量の特性に関する実態調査研究、2006年1月、日本建築学会、菊田弘輝、絵内正道、羽山広文、森太郎
 - 2) 環境系論文集、No.599、簡易予測制御を適用した高断熱建物の躯体蓄熱システムに関する研究、2006年1月、日本建築学会、菊田弘輝、絵内正道、羽山広文、森太郎
 - 3) 論文集、No.112、サーマルプローブ法による地下水流速と温度応答の関係に関する考察、2006年7月、空気調和・衛生工学会、葛隆生、長野克則、武田清香、中村靖
 - 4) 論文集、No.115、地下水流れを有する地中温度の計算方法とその応用、2006年10月、空気調和・衛生工学会、葛隆生、長野克則、武田清香、中村靖
 - 5) 論文集、No.111、土壌熱源ヒートポンプシステム設計性能予測ツールに関する研究 第二報 複数埋設管への設計性能予測ツールの拡張、2006年6月、空気調和・衛生工学会、葛隆生、長野克則、武田清香
 - 6) Applied Thermal Engineering, Volume26, Issues 14-15, Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system, January, 2006, K. Nagano, T. Katsura and S. Takeda
 - 7) 論文集、No.108、鋼管基礎杭を地中熱交換器として用いた採熱実証試験とその応用、2006年3月、空気調和・衛生工学会、長野克則、葛隆生、武田清香、中村靖
 - 8) Reviews、9-4、Field performance of a polymer electrolyte fuel cell for a residential energy system、2005年8月、Renewable and Sustainable Energy、Y. Hamada, M. Nakamura, H. Kubota, K. Ochifuji, M. Murase and R. Goto
 - 9) 論文集、No.103、画像解析を導入した路面融雪運転制御システムに関する研究、2005年10月、空気調和・衛生工学会、後藤隆一郎、濱田靖弘、窪田英樹、中村真人、長田勉
 - 10) 論文集、No.106、自然エネルギー・燃料電池活用型住宅用複合システムの研究（第3報）太陽エネルギーと燃料電池の複合利用、2006年1月、空気調和・衛生工学会、後藤隆一郎、濱田靖弘、窪田英樹、中村真人、落藤澄、村瀬光則
 - 11) 論文集、No.109、衣服の追加着用による設定室温低下と暖房エネルギー削減効果に関する研究、2006年4月、空気調和・衛生工学会、後藤隆一郎、濱田靖弘、窪田英樹
- その他、講演論文等 31件

「研究開発の将来性（イメージ図）」

（エネルギー自律型都市代謝システムの開発を通じた生活環境の改善）

概要

自然エネルギーと燃料電池の統合的利用により、徹底した省エネルギー、自然エネルギー利用を図った**エネルギー自律型都市代謝システム技術の実用化**を目指し、**暖冷房の省エネルギー化（50%削減）**を達成しながら、節約や我慢を強いることのない**快適で良好な生活空間**を実現する。

課題の背景

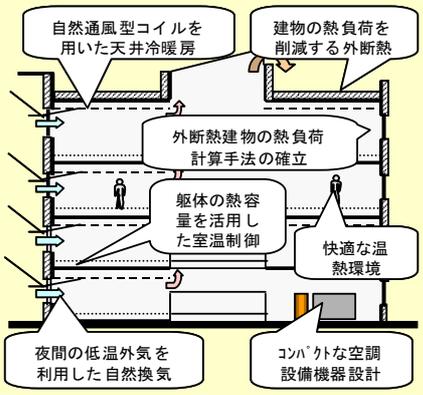
- ・ COP3議定書の発効（エネルギー消費量削減）
- ・ 安全で快適な生活環境への欲求
- ・ 環境共生・循環型社会の実現

研究の目標

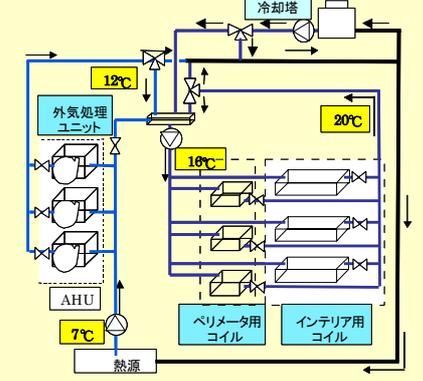
- ・ 住宅・事業建物の暖冷房用エネルギーの削減
- ・ 地域特性の自然エネルギーの有効活用
- ・ 良好な環境の下で持続可能な建築・都市創造

本技術開発の内容

（1）外断熱による低負荷型建築システムに関する研究開発

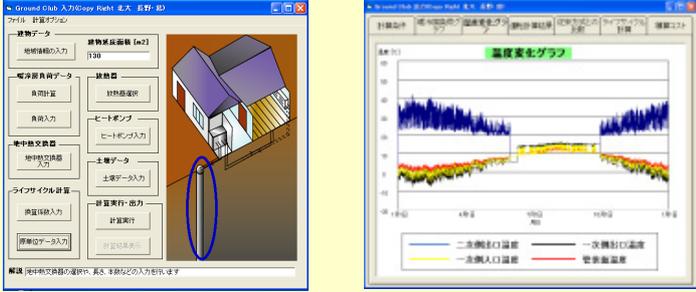


外断熱による低負荷型建築システム例



水系空調システムの構成例

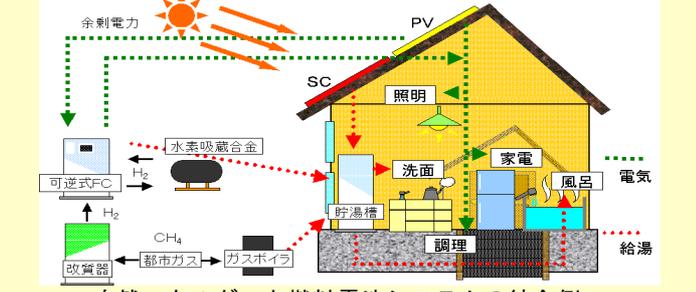
（2）自然エネルギーと次世代機器を融合した省エネルギーシステムに関する研究開発



土壌熱源ヒートポンプシステム設計性能予測ツール

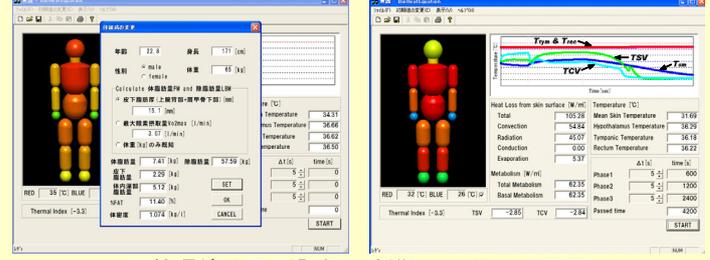


学校建築への適用例と鋼管杭を用いた地中熱交換器

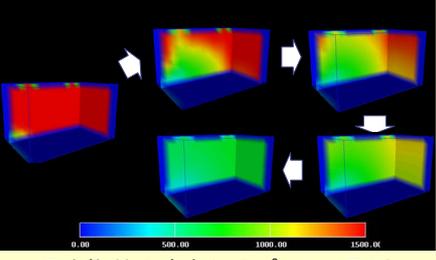


自然エネルギーと燃料電池システムの統合例

（3）温熱環境と空気環境の予測評価・制御システムに関する研究開発



温熱環境の予測評価・制御システムの画面



汚染物質の清浄化のプロセス予測