

第 4 章

効率的なエネルギー利用と快適な熱環境作り

都市・業務用ビルを中心に

| | | |
|----------------|-------|-------|
| 狛江研究所需要家システム部 | 上席研究員 | 中野 幸夫 |
| 狛江研究所需要家システム部 | 主任研究員 | 宮永 俊之 |
| 経済社会研究所 | 上席研究員 | 浅野 浩志 |
| 経済社会研究所 | 主任研究員 | 高橋 雅仁 |
| 横須賀研究所プラント熱工学部 | 上席研究員 | 岩坪哲四郎 |
| 横須賀研究所プラント熱工学部 | 主任研究員 | 長谷川浩巳 |
| 横須賀研究所プラント熱工学部 | 主任研究員 | 橋本 克巳 |
| 我孫子研究所環境科学部 | 主任研究員 | 田村 英寿 |
| 狛江研究所需要家システム部 | 研究員 | 占部 亘 |

| | |
|---|----|
| 4 - 1 業務用需要家の電力消費構造とDSM施策効果の解明 | 47 |
| 4 - 2 事務所ビルの室内熱環境の解析手法 | 50 |
| 4 - 3 ビルの空調・熱源新技術 | 55 |
| コラム：カプセル型氷蓄熱システムの性能を向上させる新しい過冷却解除剤 - 氷核活性細菌 - | 59 |
| 4 - 4 都市熱環境とエネルギー消費 | 60 |

中野 幸夫（12ページに掲載）



宮永 俊之（昭和63年入所）
 オフィスなどの室内空間を対象に、熱環境の予測、居室者の温熱感評価および省エネ策の効果予測を行うプログラムの開発を行ってきた。現在は、プログラムの高度化の一環として、照明エネルギーの削減を念頭においた室内光環境の予測手法を開発している。

浅野 浩志（12ページに掲載）



高橋 雅仁（平成7年入所）
 統合資源計画やエンドユース分析などの需要家方策の費用便益分析手法、および負荷平準化機器の普及策に関する事例研究に従事してきた。現在は、電力自由化に関連して、競争的市場に適合した電源計画手法に関する研究に取り組んでいる。

岩坪哲四郎（12ページに掲載）



長谷川浩巳（平成元年入所）
 入所以来、ヒートポンプや蓄熱、コージェネレーションなど、熱エネルギー利用分野の省エネ研究に従事。現在は、蓄熱材の探索や蓄熱システムの高性能化に取り組んでいる。



橋本 克巳（平成5年入所）
 主に二段圧縮式給湯ヒートポンプの開発と、都市・家庭などへのエネルギー供給に関する研究等に従事してきた。現在、ヒートポンプ、コージェネ等の各種エネルギー変換機器のシステム解析・評価に取り組むと共に、CO₂ヒートポンプの開発研究に取り組んでいる。



田村 英寿（平成5年入所）
 東京23区等の大都市域を対象に、数値シミュレーションによる熱環境の実態把握や緩和策の導入効果予測に携わってきた。現在は、都市中心部の街区スケールを対象に、建物・緑地の配置やエネルギーシステムの導入にともなう屋外熱環境の改善効果予測に取り組んでいる。



占部 亘（平成10年入所）
 都市熱環境の改善がもたらす、空調エネルギー消費の削減に関する研究を行っている。これまでに、日射反射効果の試算を行った。現在は、屋上緑化効果の試算に取り組んでいる。

4 - 1 業務用需要家の電力消費構造と DSM 施策効果の解明

4-1-1 統合資源計画

需要家方策（DSM）を計画・実施するにあたり、その費用便益性や環境負荷影響などを事前評価しておく必要がある。DSM を普及させることで、電源などの供給能力を抑制できるため、DSM は電力会社側の資源の代替手段、いわば需要側の資源と見なすことができる。

電源設備や送配電設備などの供給サイドの資源と全く同じ土俵で、DSM のみならずコージェネレーションや再生可能エネルギー源など需要サイドの代替資源を評価する統合資源計画（Integrated Resource Planning、IRP）という考え方が欧米で検討・実施されてきた。

統合資源計画は、従来の電源計画や流通設備計画の中で、DSM や環境外部性を明示的に考慮した上で、供給サイドと需要サイドの資源を費用便益性や環境負荷、事業リスクなどの多様な指標で統合的に評価し、不確実な環境下での社会的費用を最小化ないしは社会厚生を最大化するシステム計画手法である。社会全体にとって望ましい電力システムを構築することを目的としている。

米国では、1992年に全ての州で IRP の適用を求める法律が制定された（エネルギー政策法、EPA Act）。EU では、IRP 指針草案が作られたが、米国の IRP があまりに規制主導のため、直ちに承認はされず、市場志向型 IRP へ転換させるための議論がなされ、パイロットプログラムが実施された。現在、デンマークおよびオランダで本格的に IRP が導入されている。

我が国において、DSM を普及させて社会的に望ましい電力需要構造へ誘導するために、今後 IRP に基づいた需要家方策の検討が必要であると考えられる。我が国のエネルギー事情や需要家の行動を反映した日本型 IRP の確立が求められる。

事業会社の私的費用最小化から社会全体での費用最小化あるいは社会厚生最大化を目指す点で統合資源計画は公共政策の色彩が強い。このため、小売部分自由化以降、電力供給市場への競争原理導入の増大が予想

されるため、電力会社の私的利潤追求に基づく市場経済的手法と社会全体での効用を追求する IRP 的手法の両立を図ることが今後需要家方策を実施していく上で最大の課題になる。

4-1-2 IRP モデルの開発とピークシフト機器の普及方策への適用

ピークシフト型 DSM は、負荷移行を促す DSM 機器やプログラムを普及させることで、ピーク電力需要を抑制し、供給能力および供給コストを削減することを目的とする。供給コストの削減は、電気料金の低廉化につながるため、電力会社の事業経営のみならず、国民経済的にも望ましい DSM である。夏季ピーク需要が先鋭化し、負荷率改善が必要な我が国の電力需要に適切な DSM であるといえる。

当研究所では、供給サイド資源（新設電源）と需要家サイド資源（ピークシフト型 DSM）を電源計画の中で同時に最適化できる統合資源計画の原型モデルを開発した（図 4-1-1）⁽¹⁾。モデルは、DSM によって、供給者側に発生する事業費用や料金収入変化を考慮した上で、事業収支（＝収入－費用）を最大化するような DSM の普及助成金や導入規模を求める。但し、事業収支最大化を実行する際、DSM 導入に伴う需要家の費用便益が減少しないように制約を課しており、これがこのモデルの特徴である。モデル内で DSM の受容関数を明示的に考慮することにより需要家側の費用便益を表現している。受容関数は、需要家の DSM 投資回収年数に対する選好度の分布で表し、回収年数が短い程 DSM 参加率が上昇する。

事例研究として、事務所ビルに対する蓄熱式空調システムの普及支援策を取り上げ、モデルの有用性を検討した。対象範囲は全国大で、対象期間は 1994～2014 年度である。試算を通じて以下の事項が明らかになった。

(1) 電力会社側の費用便益における料金減収分の占める割合が大きいため、DSM の最適な普及規模や普及支援

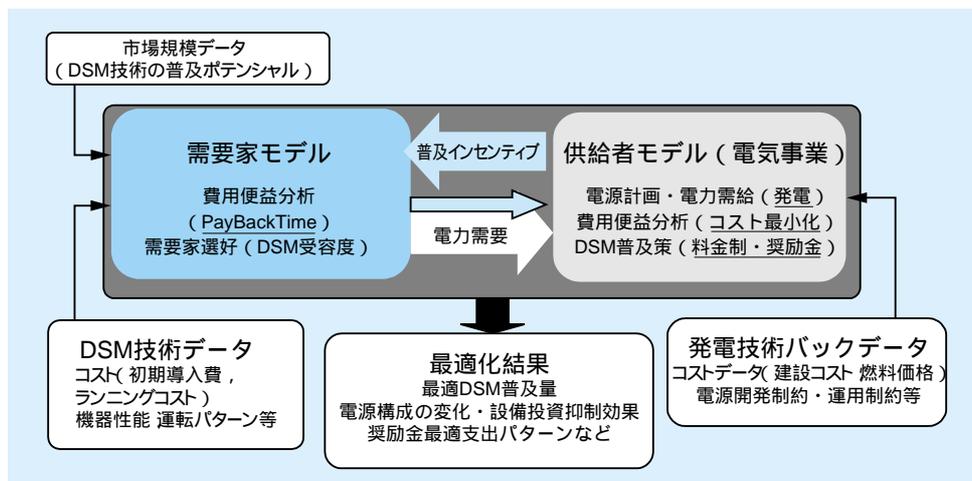


図4-1-1 統合資源計画モデル (電中研)

金はそれに大きな影響を受ける。つまり、DSMによって電力会社側に電源計画の繰り延べ便益が発生するが、料金減収がそれを上回れば電力会社自身がDSMを支援するインセンティブは発生しない。

(2)しかし、DSM機器価格に量産効果が期待できる場合、短期的には費用便益性が低いDSMでも、長期的には量産効果による費用便益性の改善が期待できるため、電力会社自身がDSMを支援するインセンティブが発生する。

普及対象を小規模ビル向けの小型蓄熱式空調システムに絞り、その量産効果を仮定した試算ケースにおいて、習熟係数が0.8の場合、1994～2014年度20年間に於いて全国大で約240万kWのピークシフトを得た(小規模ビル導入量上限の50%)。それに伴い、電源計画も順次繰り延べられる(図4-1-2)。

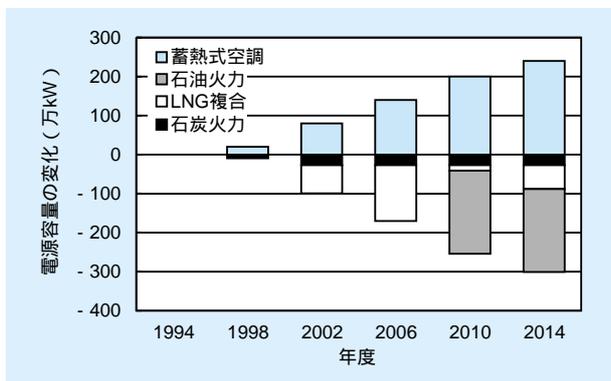


図4-1-2 IRPモデル試算例：DSM普及による電源容量の変化

量産効果を考慮した場合の普及奨励金の最適支出パターンについては、計画期間初期に奨励金を厚くし(3.4～4万円/kW)後期に奨励金を下げる(0.3～1.2万円/kW)という結果を得た(図4-1-3)。普及後の量産効果を先取りして、普及初期に奨励金を厚くする。量産効果が期待できるDSM機器では、助成策設計の際にその量産効果を折り込んだ分析が必要であることを示唆している。

4-1-3 省エネ投資とグリーン電力への選好

負荷管理型DSMのみならず、省エネルギープログラムやグリーン電力制度などの環境対応型DSMを含め、需要家サービスの開発を検討する上で、需要家機器への投資選好やサービスへの受容性を定量的に把握する

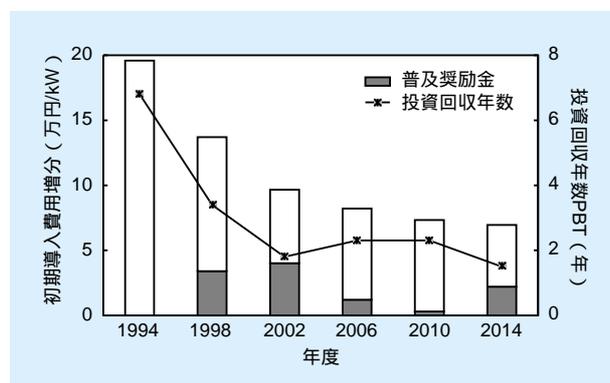


図4-1-3 IRPモデル試算例：普及奨励金の最適支出パターン

ことは大変重要である。しかし、業務部門を対象に需要家サービスへの選好を定量的に調査した例は、公開資料としては極めて少ない。

当研究所では、関東近辺1都8県内[†]に事業所がある企業と自治体を対象に、平成12年3～4月にアンケートにより、業務用需要家の省エネルギー対策への選好とグリーン電力への支払い意志額(WTP)を調査した⁽²⁾。調査方式は、電話での事前依頼に承諾した需要家へ調査票を郵送する方法を採った。業務部門の代表的業種を偏りなく網羅しつつ330件の回答を得た(有効回収率=54.0%)。

(1) 省エネ・省コスト機器への投資選好

新たにエネルギー機器を導入する際、省エネ型機器を選択するか、また選択するならば何年間の投資回収年数を期待するか尋ねたところ、「省エネ機器を選択してもよい」という事業所が全体の80.9%と圧倒的に多く、業務用需要家が省エネ機器へ潜在的な投資選好は大きいことが分かる。

期待する投資回収年数を業種別で見ると、「事務所・官公署」や「大学・短大」「文化施設」「病院・大規模」などの公共施設が期待する回収年数が3.16～3.68年と全体平均3.06年よりも長く、一方、民間企業が期待

する回収年数は平均よりも短く2.00～2.80年であった。省エネ投資については、公共施設の方が民間施設よりも積極性が高い(図4-1-4)。

(2) グリーン電力への支払い意志額

グリーン電力への支払い意志額について、需要家の使用電力量の30%をグリーン電力で供給する仮想的なグリーン電力サービス「グリーン30」を調査対象者に提示し、現在の電気代の何%アップまでならば、これを購入するか尋ねた。全体で68.5%の事業所が「価格次第では購入してもよい」と回答しており、グリーン購入希望者の平均アップ率は2.45%であった。法人向け(業務用需要家)のグリーン電力市場が立ち上がる可能性が高いことが分かった。

業種別に支払い意志額を見ると、省エネ投資選好の場合と比べて、両者に明確な相関は見られず、グリーン電力購入に関しては公共施設だけでなく民間施設も積極性が高いと言える。「小売業・コンビニ」「文化施設」が、各々5.6%、4.86%と高い支払い意志額を示している(図4-1-5)。

今後、エネルギー産業自由化の進展によりエネルギー源を越えた需要の囲い込みなどエンドユースレベルでの競争が激化していく。ここでは、事務所の空調需

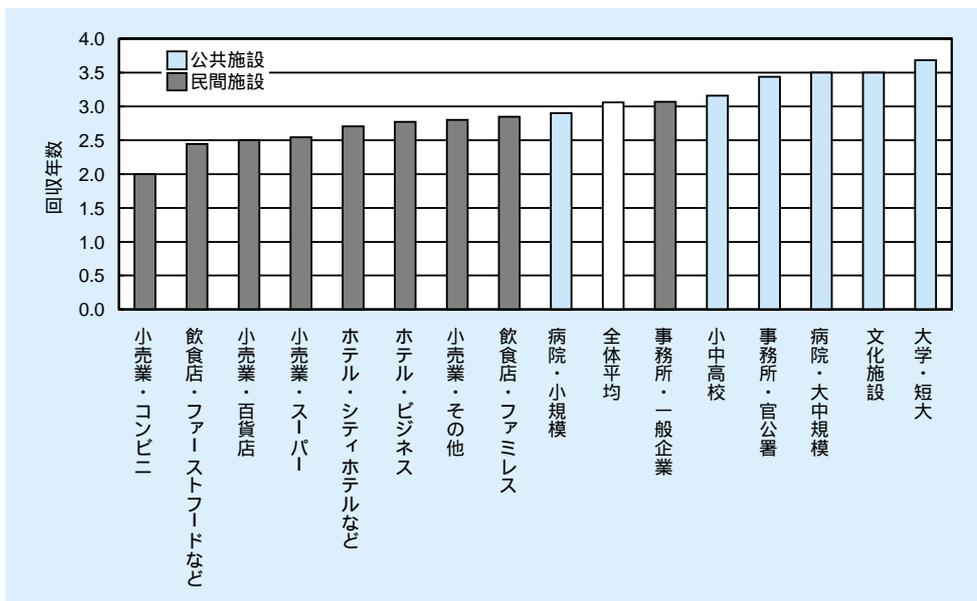


図4-1-4 省エネ投資に期待する回収年数

[†]東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県、茨城県、栃木県、山梨県、群馬県、静岡県

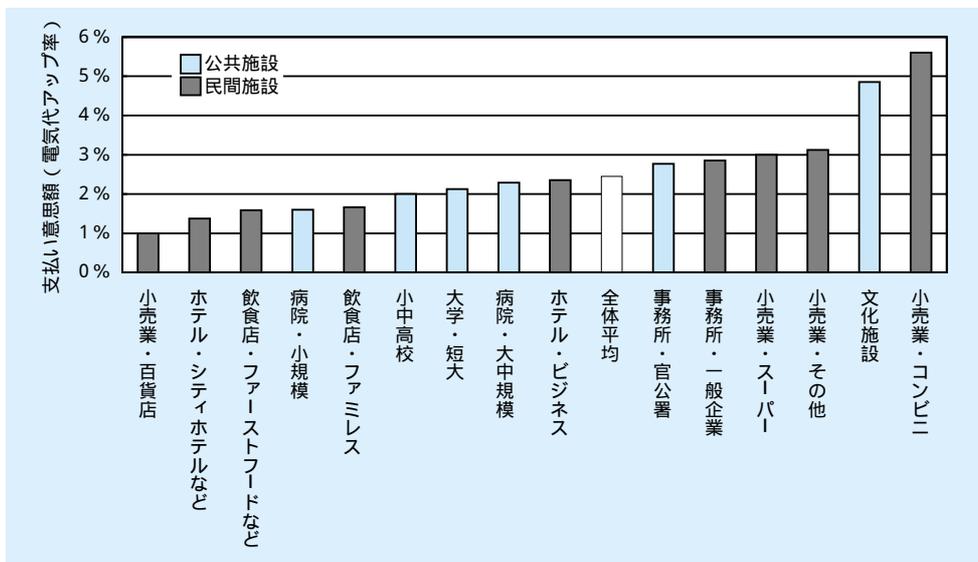


図4-1-5 「グリーン30」への支払い意思額（現在の電気代からのアップ率）

要を例に需要家のエネルギー選択行動結果を分析したが、今後は、電気式の蓄熱機器対非蓄熱機器の選択のみならず、電気機器対非電気機器、あるいはグリーン

電力も視野に入れて、非価格要因も含めて分析していく必要がある。

4-2 事務所ビルの室内熱環境の解析手法

4-2-1 快適かつ省エネなオフィス環境つくりのために

事務所ビルでは、近年、パソコンなどのOA機器などの著しい普及とそれらから発生する熱を処理するために空調の電力消費が増え続けており、地球環境保護や都市部への電力安定供給の観点から、それを削減することが社会的に強く求められている。

こうした強い省エネ要請の一方で、オフィスにおけるワーカーの温熱快適性についてはあまり配慮されていないようである。それを裏付けるように、彼らの多くは、冷暖房時の室温に対して、「暑い」「寒い」「温度ムラが大きい」といった不満をもらしている⁽³⁾し、非常に仕事がしやすくなると感じている要素を「空調設備の改善」である⁽⁴⁾と述べている（図4-2-1）。不満だらけの熱環境のもとでは労働生産性の低下は免れない。ワーカーの給与とエネルギーコストを比較すれば、彼

らの生産性を向上させることと省エネのどちらを優先すべきかは自明であろう。省エネにまして、より温熱的に快適な就業環境を提供することが優先されるべ

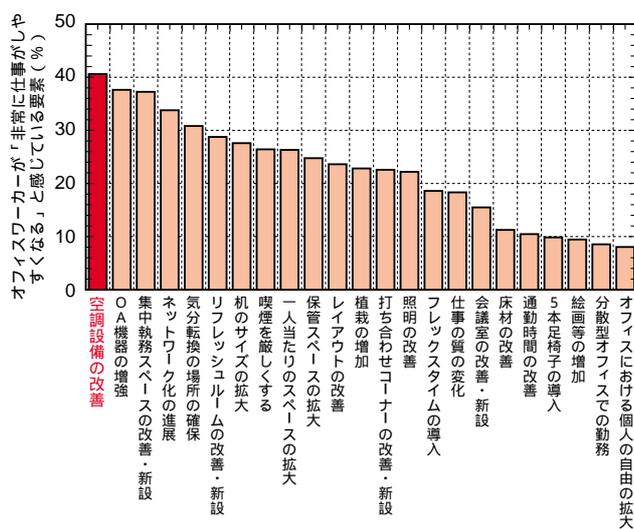


図4-2-1 オフィスワーカーが「非常に仕事がしやすくなる」と感じている要素

きである。ただし、快適性を追求するあまりに空調用エネルギーを浪費することは前述の社会的要請に逆行するものであり、未然に防がねばならない。すなわち、今後の事務所ビルにおけるオフィス環境づくりは、一見相反するワーカーの温熱快適性と省エネを両立させるように行われるべきである。

では、温熱快適性と省エネを両立させるために、具体的にはどうすればよいか。オフィス環境は、人間、建物構造、設備などに関わる多くの熱・幾何学的要因が複雑に絡み合い、相互に影響を及ぼしながら形成される。まずはオフィス内の熱環境の成り立ちや仕組みをきちんと理解しておく。その上で人体の快適性や具体的な方策を論じるべきである。そのためには、人間とその周囲環境との相互の熱的な影響を数値シミュレーションによって予め定量的に把握し、それで得た知見をオフィスの空間構造やレイアウト、空調設備の設計に応用することが近道であると考えられる。すなわち、気温やオフィス内の温度分布、ワーカーの温熱感覚などを定量的に評価できる手法を確立する必要がある。

このような目的でつくられたプログラムは従来多数存在する。その多くがゼネコンや住宅会社等で開発されたプログラムである。しかし、それらが今回の目的を達成するために必ずしも満足いく性能を備えたものとは言えない。そこで、当研究所は、「快適性かつ省エネなオフィス環境づくり」を支援するのに必要な課題のうち、従来のものに欠如している下記を盛り込ん

だ独自の手法（以後、熱環境評価プログラムとよぶ）の開発を進めてきた。

- ・人体と周囲環境の熱的相互作用（対流、伝導、放射、蒸発による伝熱現象）の解明
- ・人体の温熱感指標の定量的表現

本プログラムの最大の特長は、人体の温熱感覚に大きな影響を及ぼすにも関わらず従来無視に近いかたちあるいはかなり雑に扱われてきた放射による伝熱を適切に扱えるようにした点にある。本節では、このプログラムの内容について述べる。

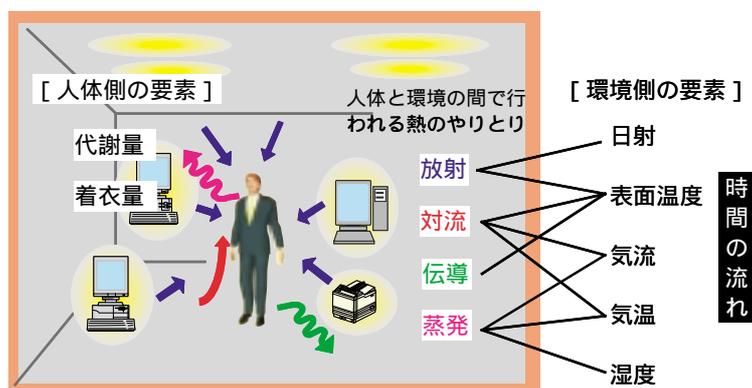
4-2-2 熱環境評価プログラム

(1) 人体と周囲環境との熱交換とプログラムの概要

当研究所で開発した熱環境評価プログラムは、人体とその周囲環境との間の対流、伝導、放射、蒸発による伝熱を解析し、室内の熱環境を適切に模擬し、人体の温熱感覚を定量的に評価できる。プログラムの概要を理解するには、人体と周囲環境との熱交換と温熱感覚を規定する要素の関係を見ておく必要がある。この関係を図4-2-2に示す⁽⁵⁾。この図からわかるように、人体と周囲環境との間の熱のやりとりや温熱感覚に影響を及ぼすのは、単に気温だけではない。以下に示す様々な要素があげられる。

人体側の要素としては

- (ア) 代謝量



*1代謝量 人体の活動状況によって体内で生じる熱のこと。激しい運動をしているときは量が多く、気温が低くても寒さを感じない。

*2着衣量 衣服の素材形状によって熱の出入りが変化する。着衣量が増すほど、気温の変化による影響は少ない。

図4-2-2 人体と周囲環境との熱交換と温熱感覚を規定する要素の関係

(イ) 着衣量

環境側の要素としては

(ウ) 気温

(エ) 気流

(オ) 湿度

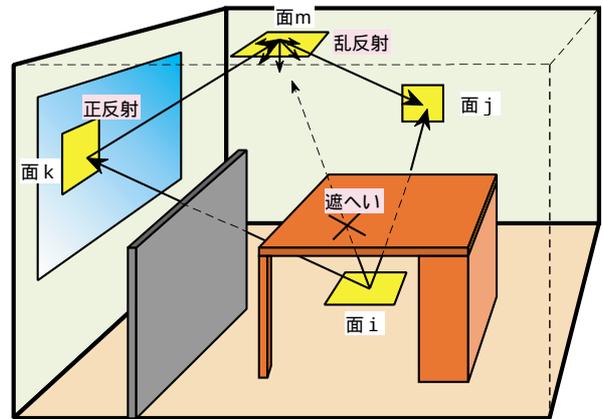
(カ) 放射 (室内の表面温度などと深く関係する)

がある。上記の人体側・環境側の要素は、人体と周囲環境間の対流、伝導、放射、蒸発による伝熱と複雑に関係しており、それぞれの量を決定する。本プログラムでは、上記の伝熱の要素をすべて考慮した熱バランス式を解くことによって、室内の気温、気流および表面温度の分布などを時間の流れに沿って計算できるようにした。これら計算結果から人体の放熱量を計算し、温熱感覚を予測できる(この過程の詳細を、(3)と(4)で後述する)。本プログラムの最大の特長である人体と周囲との放射伝熱の扱い方について(2)で詳しく説明する。

(2) 物体間の放射伝熱量の計算

放射伝熱とは、赤外線は可視光線と同じように空間を伝わり、到達した物体に赤外線が直接吸収されて熱を伝えることである。接触によって生じる対流や伝導による熱の伝わり方とは異なる。途中で障害物があると赤外線が遮られるので、熱が伝わらない。また、鏡のような反射体があると赤外線は反射して向きを変え移動する(図4-2-3)。

オフィスには様々な形の障害物や反射体が立体的に配置され、互いに熱的影響をおよぼし合っているため、放射伝熱現象は複雑化する。「冷えた窓」による冷放射、「日射を吸収して焼けた壁」によるほてり等に代表されるように、放射伝熱は人体の温熱感に大きな影響を及ぼす。したがって快適なオフィス環境をつくるためには、ワーカーを含め、室内にある全ての発熱源の発する赤外線、窓から室内へ入射する日射が、家具や壁などでの吸収や反射を経て、室内各所の温度をどのように上昇させるかをあらかじめ知ることが重要である。併せて、ワーカーまわりの熱環境を評価するための人体モデル、温熱感を評価するための指標を検討することも、前記の解析結果を効果的に活用する上で重要である。しかしながら、これらを精度よく、かつ、効率的に実現する方法はこれまでほとんど見あたらなかった。そこで、当研究所では任意の形をした物体間の赤



面 i から射出され、面 j に到達する赤外線は さまざまな経路をとる。

図4-2-3 空間内の赤外線移動の様子

外線による熱移動(放射伝熱)量を的確に解析するプログラムを開発した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。このプログラムは、従来広く使用されている光線追跡法を改良した独自アルゴリズムを基礎として構築されている。これに、障害物による遮へい、空間内の多重反射および波長に対する物体表面の反射や吸収特性を考慮でき、少ないメモリと計算時間で高精度な結果が得られるよう工夫を施している。さらに、従来開発されている対流と伝導による熱移動のプログラムを組み込み、室内各部の温度分布を時間の流れを考慮しつつ詳細に解析できるようにした。また、屋外から室内への熱伝導や日射の侵入の過程を時間の流れを考慮しつつ詳細に模擬できるように、躯体の熱応答の時間遅れや蓄熱の効果、隣接する周囲のビルによる日射の遮へいや周囲のビルからの熱放射の影響を解析に取り込めるようにした。冷房のための電力需要がもっとも大きくなる気象条件の日を対象に、密集した街区の中に建っている事務所ビルの中間階(4F)のオフィス内の壁面温度分布変化を解析した事例を図4-2-4に示す。

(3) 熱環境を評価するための人体モデル

人体表面から周囲へ放出される熱量は、人間が暑い、寒いなどと感じる温熱感と密接に結びついた重要な量である。したがってオフィスの熱環境を適切に評価するには、適切な人体モデルを用いて人体からの放熱量を計算する必要がある。当研究所は、室内環境の評価のための人体モデルを新たに開発した⁽⁴²⁶⁾(図4-2-5)。

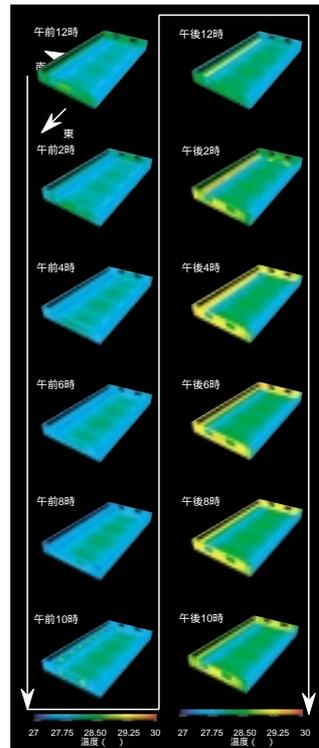
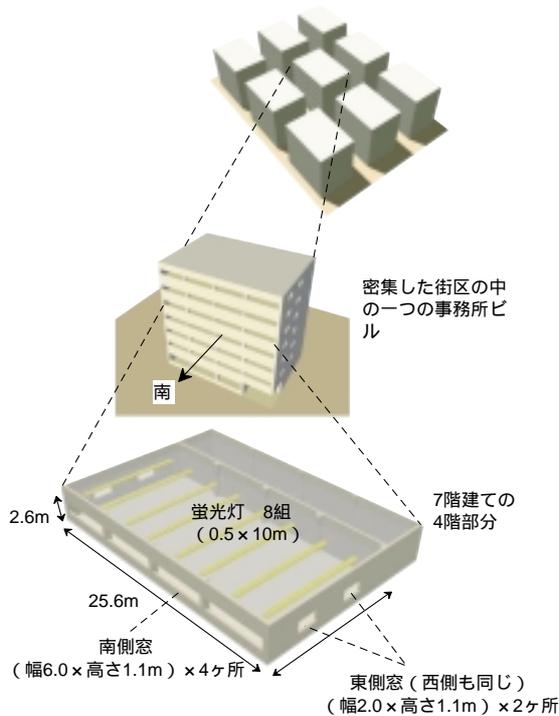


図4-2-4 事務所ビルの居室内の温度分布変化の解析事例

このモデルは、形状を工夫した円柱と直方体を組み合わせて作成した比較的単純な形をしているが、実質的な体表面積、および、人体表面形状を、実際の人体に近い値で表現できることを確認している。皮膚の温度分布については被験者の実測データを使用しており、人体からの放熱量を的確に模擬するように工夫している。この人体モデルを解析モデルに組み込み、解析し、人体の皮膚温度や人体周囲の熱環境に関わる詳細な情報を評価することができる(図4-2-6)。現状では、適用できる場面が限られるが、今後、姿勢や着衣量を自

由に変えることができるようにするなど実用的なモデルへの発展を目指す予定である。

(4) 人体の温熱感覚の推定

人間は活動状態に応じた量の熱を放射、対流、伝導によって放出される顕熱あるいは呼吸、発汗によって放出される潜熱のかたちで体外に放出することで体温を調節する。周囲の熱的な条件によって放熱がさまたげられると暑く、また、必要以上に放熱が促進されると寒く感じる。放熱量を求めて温熱感を定量化する研究が欧米を中心に行われ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、現在ではいくつかの温熱感指標[†]が広く用いられるようになった。しかしながら、この研究では人体は空間に浮かぶ点で表現されるなど極端に簡略化されるため、人体と壁面などとの空間的な位置関係が適切に表現できず、放射による放熱量の計算が困難であった。このことによって、温熱感を適切に評価できない恐れがあった。そこで、前述した人体モデルを用いて計算した放熱量をもとに、従来の温

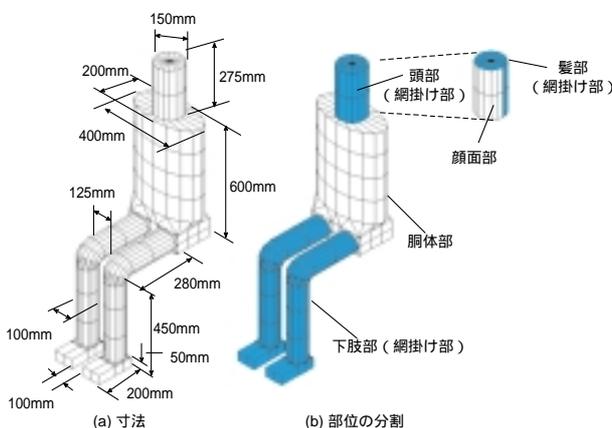


図4-2-5 室内環境の評価のための人体モデル

[†]代表的な温熱感指標として、デンマークで開発されたPMV (予想平均申告)がある⁽⁹⁾。気温・湿度・気流速度・平均放射温度(周囲の固体表面温度分布の平均値)、人体の着衣および作業の程度から計算できる温熱感指標で、-3(寒い)~0(どちらでもない)~+3(暑い)の値で表現される。

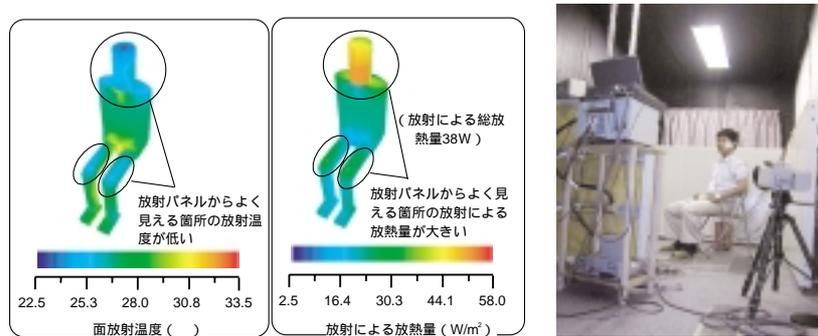


図4-2-6 人体モデルを用いた評価結果（天井パネルによって冷房された居室内における事例）

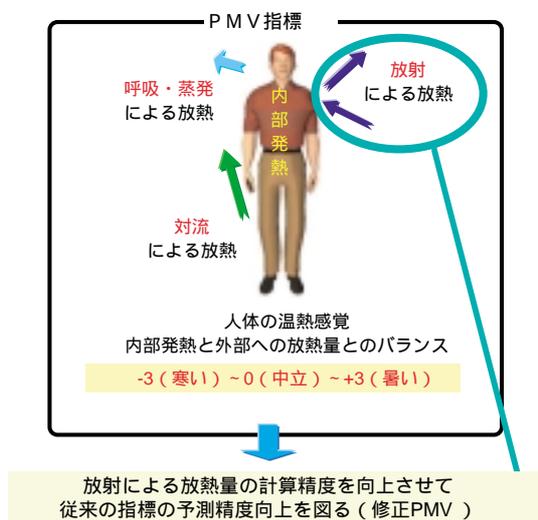


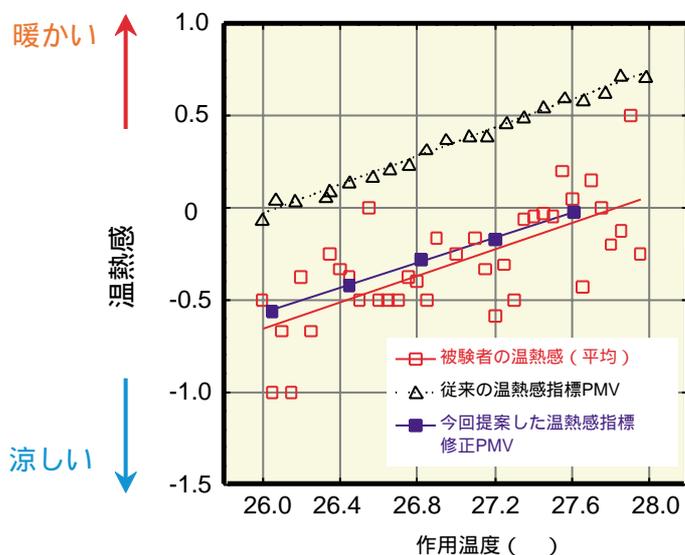
図4-2-7 PMV指標の修正方法

熱感指標PMVを修正する方法を考案した（図4-2-7）。

考案した温熱感の修正指標の妥当性を調べるために、一定の環境に制御された室内において、百数十名の被験者に温熱感をアンケート調査した。この結果、従来の温熱感の指標より今回開発した修正指標のほうが被験者の温熱感をよりの確に表していることがわかった（図4-2-8）。

4-2-3 今後の進め方

オフィスを対象とした室内の熱環境およびワーカーの温熱快適性を定量的に評価するための熱環境評価プログラムを開発した。今後は、快適性と省エネを両立させるオフィス環境づくりに役立ててゆきたい。当面



（放射と空気の両方が人体に与える影響を評価する温度指標）

図4-2-8 PMV指標と修正指標の比較事例

の適用先として、電気事業が進出しつつある建物品質評価格付け事業やESCO事業での利用を念頭に置く。

また、事務所ビルにおける空調や照明のスケジュール等を今回開発したプログラムに取り込んで、熱環境をより現実に近いかたちで解析できるようにしたり、プログラムを空調設備設計に的確に反映させるための

検討を進める予定である。さらに、事務所ビルにおいて空調について大きなエネルギー消費量を占める照明に着目し、昼光の利用等による照明エネルギーの省エネを念頭において光環境の解析手法を新たに開発し、実用性の観点から他の類似した手法との差別化を図りたい。

4 - 3 ビルの空調・熱源新技术

4-3-1 氷蓄熱式放射冷房システムの提案

放射冷房は放射伝熱を主体にした冷房方式で、従来の対流伝熱を主体にした冷房方式に比して不快な冷気の流れがほとんどなく、快適で静穏な室内熱環境を実現できる方式である。当研究所では放射冷房に氷蓄熱を組合せた氷蓄熱式放射冷房システムを事務所ビル用の新しい空調システムとして提案してきた。氷蓄熱の特長を十分に活かした新しい空調方式を開発することで氷蓄熱の普及を支援するためである。また、氷蓄熱を利用することによって放射冷房そのものの性能を向上させることも意図している。

提案する氷蓄熱式放射冷房システムのコンセプトを図4-3-1と表4-3-1にまとめた。図4-3-1に示すように、屋上の氷蓄熱槽には夜間電力を利用したヒートポンプによって氷として冷熱が蓄えられる。昼間の冷房時に

は氷蓄熱槽から1～4の冷水が各階にある空調機に供給される。空調機ではその冷水を利用して低温低湿の空気を作り、それを天井に設置された金属製の放射冷房パネルと天井スラブとの間に吹き込む。冷却されたパネルは、居室者やOA機器、床面や壁面等からの熱放射を吸収することで冷房を行う。また、吹き込まれた冷気は窓側端部から室内に供給され、換気とペリメータの熱処理に使われる。このシステムでは、氷蓄熱の採用によって供給冷水温度を通常の水蓄熱のものより低い1～4とすることができ、これによって搬送動力の低減が見込める。同時に除湿能力が向上した分、低湿な空気を室内に供給することができる。従来より低い湿度の空気を供給する分、室内の温度を従来より高めても放射冷房の効果とあいまって同等の温冷感が得られることが期待される。また、室温を高めた分だけ外部からの侵入熱負荷を低減させ、省エネになる可能性がある。さらに、放射パネル冷却後の低温低湿空

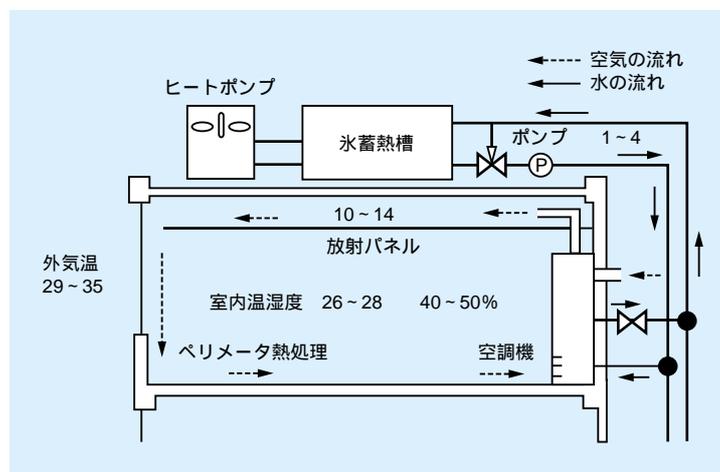


図4-3-1 氷蓄熱式放射冷房システムの概念図

表4-3-1 氷蓄熱式放射冷房システムの五つのアイデア

| | |
|---|--|
| 負荷平準化への寄与 省エネルギーへの寄与 ・搬送動力低減 ・侵入熱負荷の低減 ・熱エネルギーのカスケード利用 温熱快適性の向上 放射冷房の性能向上 ・結露防止 ・熱負荷追従特性改善 イニシャルコストの軽減 | ・氷蓄熱の採用 ・氷蓄熱の採用による低温冷媒供給 ・温度高め、湿度低めの室環境設定 ・放射パネル冷却後の低温低湿空気を再利用 ・放射冷房の採用 ・氷蓄熱から得られる低湿空気を室内に供給 ・放射と対流のハイブリッド方式を採用 ・大温度差利用による搬送系容量の低減 ・ダクトレス方式の採用 |
|---|--|

気を室内に供給することで放射冷房の欠点である結露の危険性を確実に防止できるものと期待される。その上、これによって本質的にあまり大きくない放射冷房パネルの除熱能力を補い、空調システムとしての熱負荷追従特性も改善されることが見込まれる⁽¹⁾。

図4-3-2は、提案する氷蓄熱式放射冷房システムを導入したモデル事務所ビル（延べ床面積3,300m²）の負荷平準化効果、省エネルギー性能、ランニングコスト、イニシャルコストのシミュレーション結果である。氷

蓄熱式放射冷房システムは、氷蓄熱をもたない放射式と比較して、3割強のピークカット、1割の省エネ、3割の電気料金の節約が期待される。氷蓄熱式としなければ放射式はエネルギー的にもランニングコスト的にもメリットは見出せない。氷蓄熱式放射冷房システムの夏季ピーク電力最大値および年間消費電力量は氷蓄熱をもつ対流式とほぼ同等である。また、両者の投資回収年もほぼ同等である。これらから、氷蓄熱の採用を前提にした場合、放射冷房がもたらす温熱快適性

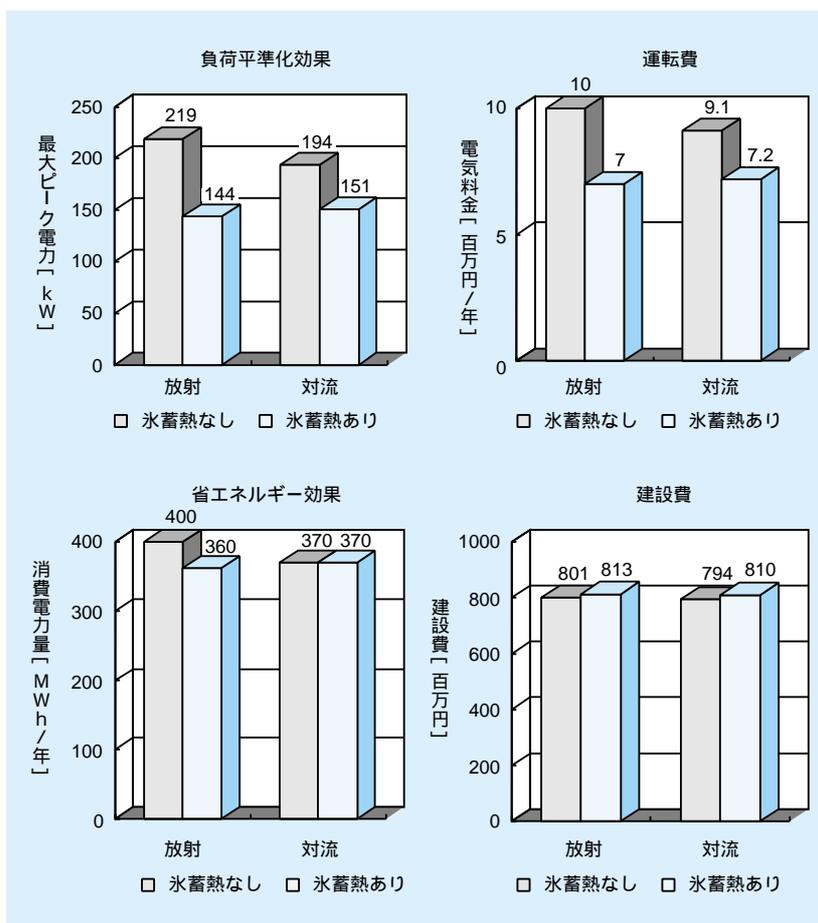


図4-3-2 氷蓄熱式放射冷房システムを導入した事務所ビルの評価結果



図4-3-3 放射冷房システムを設置した実験室

等を考慮すると本システムの市場競争力は高いと考
えている¹²⁾¹³⁾。現在、提案するコンセプトに基づいた放射
冷房システムの実規模装置（図4-3-3参照）を試作し、
温熱快適性の確認等のほか、システムの制御法の開発
など、実験的な検討に取り組んでいる。

4-3-2 業務用空調システムの運転シミュ レーション・評価手法

業務用空調システムでは、エネルギー源として電気、
ガスのいずれを用いるかをはじめとして、熱源機器
（ヒートポンプチラー、ビルマルチ、蓄熱システム、ガ
吸収式、ガスエンジンヒートポンプ、コージェネ等）、
冷房・暖房負荷、さらに、蓄熱システムでの蓄熱容
量・コージェネでの発電容量など、システム選択肢な
らびに設計パラメータが極めて多い。このため、空調
システムの設計を行うためには、運転シミュレーショ
ンを行って想定される負荷に対してシステムがどのよ
うに運転されるかを予測することが必要である。その
結果をもとに、エネルギー消費量・エネルギーコス
ト・負荷平準化効果などを求め、システムの評価、最
適化を行うことが可能となる。電力中央研究所では、
このような設計・評価を行うため運転シミュレーショ
ン手法を開発しビルの業務用空調地域熱供給など各種
システムの評価を行ってきた。

空調システムの評価では、一般的には、まず最大空
調負荷をもとにシステム設計を行い、次に12ヶ月代表
日の空調負荷について1日の運転シミュレーションを
行い、それらの合計として、エネルギー消費量を求め

ている。

電力中央研究所では、12ヶ月代表日の運転シミュレ
ーションを表計算ソフトを用いて各時刻の機器の運転状
況・エネルギーバランス（図4-3-4）を作成している¹⁴⁾。
この計算では、まかなうべき基本的には、空調負荷に
対して、ヒートポンプなどの各熱源機器の出力を充当
することにより、各機器の必要な運転パターン・台数
を求めている（図4-3-5）。これまで、蓄熱式ヒートポ
ンプ、ガス吸収式の比較、氷蓄熱ビルマルチ、ガスエ
ンジンヒートポンプ、給湯ヒートポンプ、マイクロGT
システムなどの運転シミュレーションを行いシステム
構成、評価、最適化に関するノウハウを蓄積してきて
いる。

月代表日の負荷を用いる手法の問題点は、実際には
日ごと負荷は異なり月代表日からの負荷のバラツキが
生じることである。このことは、特にコージェネのよ
うに熱負荷だけでなく電力負荷にも対応するシステム
の場合に、電力負荷は他の空調負荷と傾向が異なり、
システム設計上も電力と熱のバランス（熱電比）が重
要であるため特に重要な問題となる。電力中央研究所
では、冷房・暖房・給湯・電力について地域内での自
給率を高めた地域熱供給システムを対象に365日（8760
時間）の運転シミュレーションを行う専用プログラム
を開発し、評価を行っている¹⁵⁾。これらのコージェネお
よび空調システムの運転シミュレーションについては、
マイクロガスタービン、PEFCなどの最新の技術を入れ
ていながら、今後、手法の高度化を図っていく予定
である。

コラム カプセル型氷蓄熱システムの性能を向上させる新しい過冷却解除剤 - 氷核活性細菌 -

カプセル型氷蓄熱システムは、潜熱蓄熱物質である水(氷)を密封したカプセルを蓄熱槽内に充填し、冷凍機や空調機等と結合して蓄・放冷熱 (= 製氷・解氷) するシステム (図1) である。カプセルの周囲を流れる熱搬送流体 (= エチレングリコール水溶液等) との熱交換性能が良く、システム構成が単純で、蓄熱槽の大容量化が容易である等の長所を持つ。

一般に、カプセル内に密封された水は、温度が融点 (= 0) 以下になっても凍らない、いわゆる「過冷却状態」になり易い。また、カプセル内の水は各カプセル毎に独立しているため、蓄熱槽内に充填された全てのカプセルを凍らせるためには、蓄冷熱が完了するまで凍結開始に必要な低い温度に熱搬送流体を保たなければならない。しかし、熱搬送流体を冷やす冷凍機の蓄冷熱 COP は、凍結開始温度 (= 過冷却解除温度) が 1 度低くなるごとに約 3 % も低くなるのが、当研究所の試算によりわかった (図2)。

よって、水の凍結開始温度を上げることがカプセル型氷蓄熱システムの性能向上の決め手となり、そのための最も有効な手段が「過冷却解除剤」の添加である。これまで実用化されてきたカプセル型氷蓄熱システムにおいては、過冷却解除剤としてヨウ化銀 (AgI) が利用されてきた。しかし、高

価で劇物であることから、より安価・安全で過冷却解除能力の高い物質が望まれている。

そこで、当研究所では、様々な物質を添加した水について、凝固・融解の繰り返しによる過冷却解除能力の評価試験を行ない、「氷核活性細菌」が有望であることを確認した (図3) (6)。

現在、滅菌方法等の異なる各種氷核活性細菌の過冷却解除能力評価試験を行っており、それをもとに氷核活性細菌のカプセル型氷蓄熱システムへの適用可能性を評価する予定である。

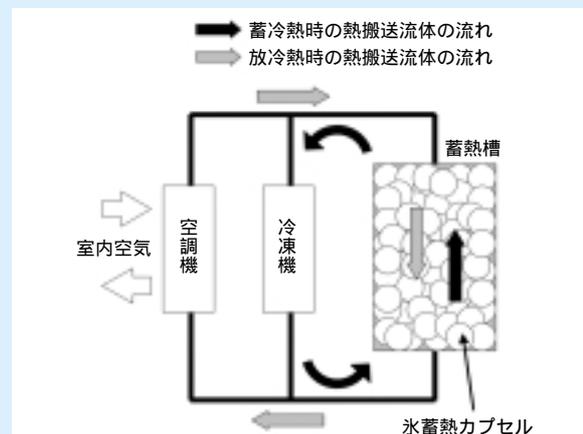


図1 カプセル型氷蓄熱システムの構成概略

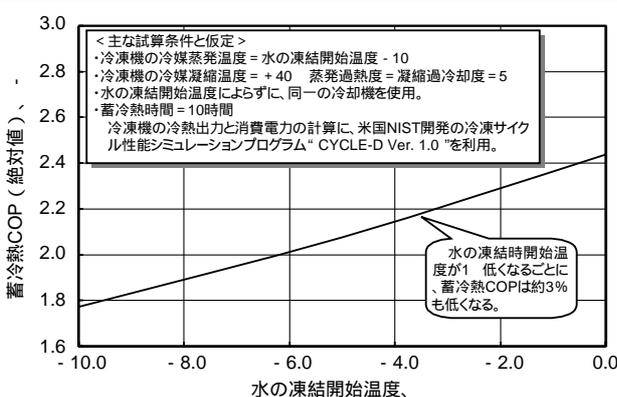


図2 カプセル内の水の凍結開始温度が冷凍機の蓄冷熱COPに及ぼす影響の試算結果

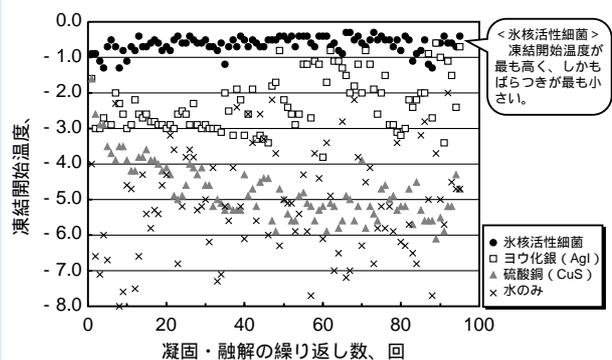


図3 代表的な過冷却解除剤に関する過冷却解除能力の評価試験結果

4 - 4 都市熱環境とエネルギー消費

4-4-1 はじめに

「ヒートアイランド」は、都市特有の温暖化を表す言葉として広く定着しつつある。夏場のヒートアイランドは、真夏日や熱帯夜を増加させることで都市生活における快適性を低下させるとともに、都市部のエネルギー消費の増大にも密接に関連している。例えば、東京都では真夏の最高気温が1℃上昇すると、平日の最大電力需要は約160万kW増加する。すなわち、ヒートアイランドによる都市の高温化がエネルギー消費を助長し、さらには電力需要ピークを先鋭化させ負荷率を低下させる要因になっている可能性がある。

ヒートアイランドを緩和するためには、その主要な成因といわれている「緑地の減少や人工舗装面の増加に伴う地表の熱特性変化」や「エネルギー消費に伴う人工排熱の発生」に着目し、これらを緩和する方策が考えられる。具体的には、屋上緑化や透水性舗装による蒸発熱の増大、白色塗装による日射反射の増大、省エネ技術の導入による人工排熱削減などが挙げられる。

さらに、都市の熱環境緩和を考える上で無視しえないもう一つの重要な要因が、地上付近の風・日射・長波放射を変化させる「建物」である。建物の存在を考えた上で屋外空間を上手に活用しながら対策技術を導入することで、さらなる熱環境改善、省エネ、負荷平準化につながることも期待できる。

こういった対策の導入効果を都市において実証するためには、実験規模の大きさや屋外実験条件の不安定性など、多くの困難をともなう。このため、数値シミュレーションによる効果の評価が有効である。ここでは、「都市全域スケール」、「建物スケール」の2つの空間スケールを設定し、建物の存在を考慮した対策技術の導入効果について数値シミュレーションによって検討を行った事例を紹介する。

4-4-2 建物の上空に熱を逃がす

- 都市全域スケールでの検討事例 -

(a) 広域を対象とした解析の重要性

ヒートアイランドは、地域毎の地形や風系などの環境下で形成される現象である。このため、例えば海風・陸風・弱風時などの時間帯毎にヒートアイランドの強さや現れ方は異なる。また、ある地域における熱的な変化は、熱の移流を通じて風下側の地域の熱環境をも変化させる。したがって、ヒートアイランド緩和策を論じるにあたっては、都市域程度の広い空間スケールに視点をおいた検討を行うことが重要である。

こうした背景から、ここではヒートアイランドを広域的に解析できる三次元数値モデル（以下、ヒートアイランドモデル）を実在する大都市である東京23区に適用して、主に建物と建物間の気温に着目して、人工排熱の削減等の施策による熱環境緩和効果について評価を行った。詳細については、文献(14)、(15)を参照されたい。

(b) 建物効果を考慮できる広域モデル

このヒートアイランドモデルは、電力中央研究所で開発したものであり、地形・土地被覆・人工排熱の分布を考慮して、地上から高度約5000mまでの三次元風速・温位・比湿等の空間分布およびそれらの時間変化を計算することが可能である。大気中の水平分解能は1～数km程度であるが、地表は数100m程度の分解能で計算できる。また、地表の水平メッシュ内での平均的な建物の密度や高さを変数として放射や風の遮蔽効果を考慮することによって、人間が屋外活動を営む建物と建物間の熱環境を評価できる点に特徴がある（図4-4-1）。なお、このモデルを東京23区に適用した計算結果と東京都一般環境大気測定所のデータを比較して、両者が概ね一致することを確認している。

(c) 建物間の気温分布はどうなっているか

晴天弱風の真夏日であった1996年8月22日14時にお

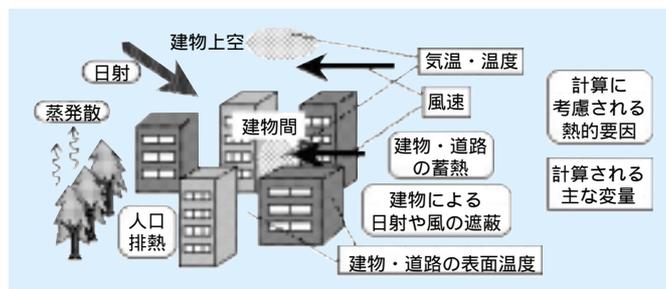


図4-4-1 解析に使用した三次元数値モデルの概要
(計算に考慮される熱的要因と主な計算変量)

ける建物の屋上のすぐ上（以下、建物直上）および建物と建物との間（以上、建物間）の気温分布の計算結果が図4-4-2である。

建物直上では、東京23区内のうち北部～北西部の地域で気温が最も高い。これは都心で暖められた空気が海風によって内陸に流されることなどが原因と考えられる。

一方、建物間では、全体的に建物直上よりも気温が高いことに加え、都心や副都心でも気温が高くなるという特徴が見られる。これは、図4-4-3に示すようにエネルギー消費に伴う人工排熱の放出量が都心や副都心で特に多く、建物間の風の通りが悪いために、この熱が上空に移動せずに建物間にたまりやすいことが一因となっている。

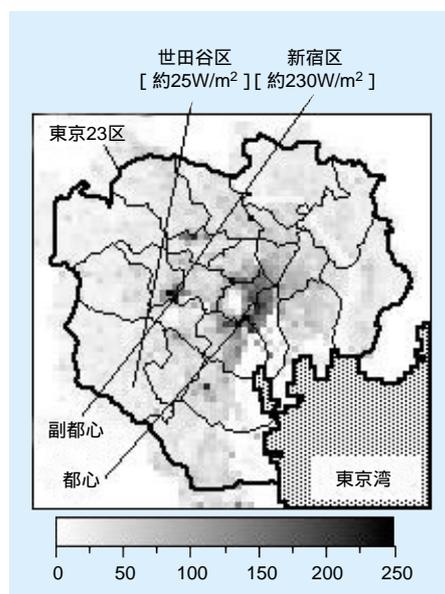


図4-4-3 夏場の東京23区における日中14時の人工排熱分布

(d) 人工排熱放出の工夫で熱環境を緩和する

続いて、先の計算条件を基準として、人工排熱に着目した施策を都市内に導入したときに熱環境がどの程

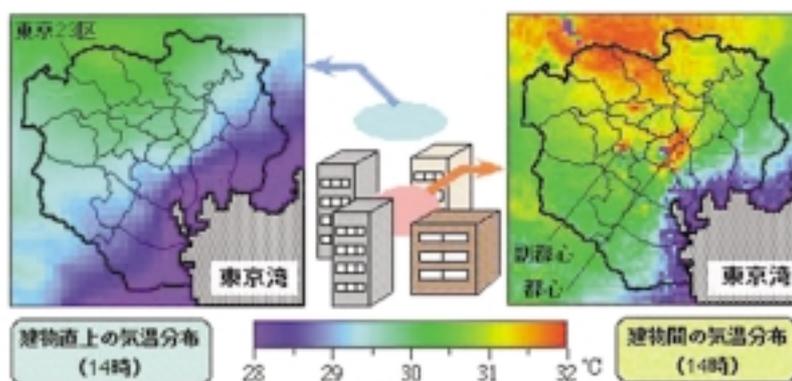


図4-4-2 真夏日の東京23区における建物直上および建物間の気温分布の計算結果
(ここでいう建物直上とは、建物の屋上のすぐ上を指す)

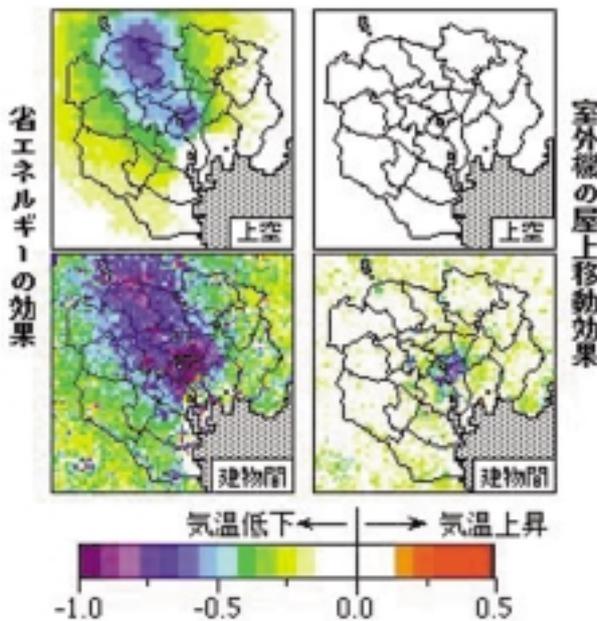


図4-4-4 東京23区を対象としたヒートアイランド緩和効果の緩和効果の試算結果（真夏日の日中14時）

度緩和されるかを試算した。

まず、省エネ策を導入して人工排熱を50%削減した場合、建物間では建物直上の約2倍の気温低下が見られ、都心の建物間気温が約1.5℃下がること示された（図4-4-4(1)）。この気温低下が夏場の冷房需要を減らし、新たな省エネを生み出すことが期待される。

続いて、壁側のエアコン室外機を屋上に移動した場合を想定し、建物間で放出される人工排熱の50%を建物直上に直接放出させた場合、都心の建物間では先の省エネ策を導入した場合の半分程度気温が低下することが示された（図4-4-4(2)）。

建物が密集し排熱量も多い都心の建物間は、日中に熱が籠って高温化しやすい。しかし、省エネや排熱の放出位置を工夫することによって熱環境を改善できることが示された。この知見は、今後、分散型電源などの排熱源が都市内に普及した場合にも応用できる。

4-4-3 日射を反射することの功罪 - 建物スケールでの検討事例 -

4-4-1項で述べたように、ヒートアイランドの緩和は、都市熱環境の改善のみならず、負荷平準化や省エネルギーにも寄与するものと期待される。都市熱環境の改

善がエネルギー消費に及ぼす影響を評価するため、電力中央研究所では、建物周辺の熱環境と建物のエネルギー消費とを結びつける数値シミュレーションモデルの開発を行っている⁽⁹⁾。

このモデルは、4-4-2項で述べた都市全域スケールのシミュレーション結果などから街区周辺の境界条件を引継ぎ、建物周辺の熱環境と建物のエネルギー消費を求める建物スケールの数値シミュレーションである。このモデルでは、図4-4-5に示すように、対流や建物間の放射や反射の影響を考慮することによって、建物の空調負荷を評価できる。

この熱環境数値シミュレーションを用いて、ヒートアイランド緩和方策の一例として都市の日射反射率を増加させた場合について、負荷平準化と省エネルギー効果を評価した。ここで考える日射反射率の増加は、アメリカを中心に開発されている日射反射塗料⁽¹⁰⁾を想定している。この塗料は、様々な工夫によって、日射反射率を0.8以上に増加させている。数値シミュレーションの解析対象として、東京の大手町のように、ビルが密集している地域を想定し、ビル密集市街地をモデル化した。この市街地にある全てのビルの屋上面や外壁面の日射反射率を、0.3（通常のコンクリート表面）から0.8（塗料表面）に増加させた場合について、真夏の冷房負荷の増減をシミュレーションした。

この結果、図4-4-6に示されるように、屋上面のみ日射反射率を増加させた場合には、冷房負荷ピークが4%減少した。一方、外壁面のみ日射反射率を同様に増加させた場合には、冷房負荷ピークが7%増加し、逆効果

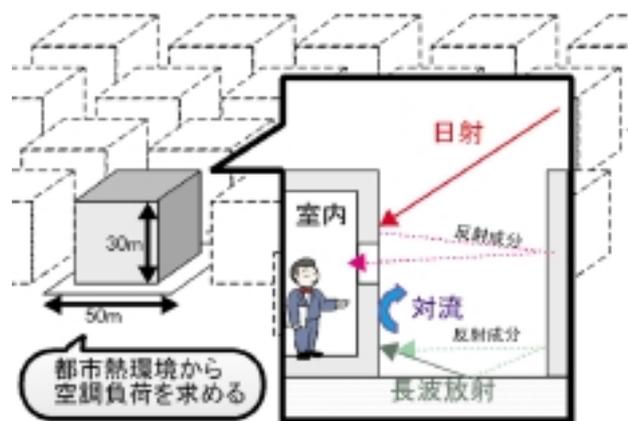


図4-4-5 都市街区スケールの数値シミュレーション

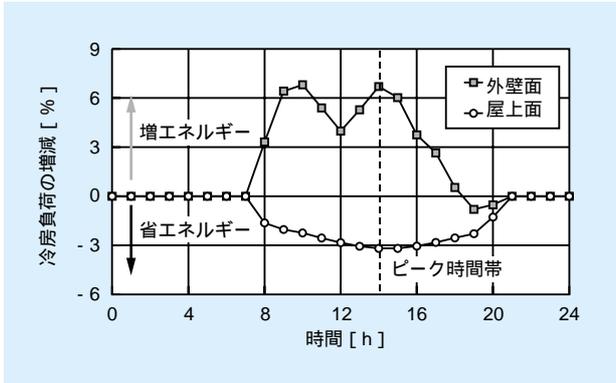


図4-4-6 日射反射率の増加による冷房負荷の削減効果

となった。これは、周囲のビル外壁で反射された日射の一部が窓を通して室内に入るためである。なお、図4-

4-6は、日射反射率を増加させない場合のピーク冷房負荷を基準値として、冷房負荷の増減を百分率で表したものである。

このように、日射を反射させることによって冷房負荷の増加などのデメリットを生じさせる可能性もあり、周囲の状況をよく考慮して行う必要がある。今後は、数値シミュレーションによって、屋上植栽による緑化や通風の促進など、他のヒートアイランド緩和方策の負荷平準化・省エネルギー効果を評価していく予定である。また、これらの結果を用いて、ヒートアイランド緩和方策の費用対効果の分析にも活用する予定である。