

ビルの蓄熱式空調システム

Thermal Storage Air-conditioning System of Buildings

相良 和 伸*

Kazunobu Sagara

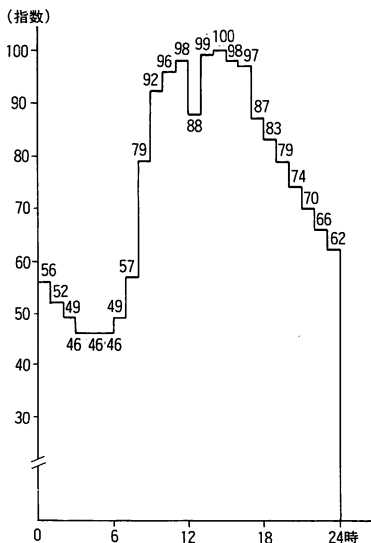
1. ライフスタイルとエネルギー消費

図-1は、C電力会社の夏のピーク時の典型的な電力負荷の一日の変化を示したものである。昔からよく言われているように、この時期はちょうど甲子園の高校野球の時期と重なり、多くの日本国民は暑熱の日中に冷房を利かした部屋で、冷蔵庫で冷やしたビールを飲みながらテレビを見ていることになっている。まさに、これはわが国における典型的な真夏のライフスタイルと言えるかもしれない。

図-2は、少し古いデータではあるがC電力会社の最大電力に占める冷房需要の割合を示したものである。実に3分の1の電力が冷房用に使われていることになっている。また、その比率も年々増加傾向にある。しかし、図-3に示した住宅の用途別年間エネルギー消費量

をみると、冷房が普及したと言っても、暖房と比べると家庭で消費されるエネルギーのほんの一部分しか占めていないことが分かる。もちろんこれは年間をトータルした場合の比率であって、夏の電力消費に冷房が占める割合はけっして小さいとは言えないかも知れない。しかし、電力需要がピークとなる日中に限って言えば、土曜・日曜は別としても、日中は主婦だけが在宅していなかったり、また、共稼ぎ夫婦も多いとすれば、家庭で冷房に電力がそれほど消費されているとは考えにくいのではないだろうか。もっとも、電力需要がピークを迎える時期には、日頃節電に務めている家庭でも我慢しきれなくなって日中から冷房するのではないかと想像される。また、夏休み中の子供が冷房の効いた部屋でファミコンゲームに夢中になっているということもあるのかも知れない。

都市の中心部に林立するビルについてはどうだろうか。図-4に事務所ビルの用途別年間エネルギー消費量を示した。一般の事務所ビルでのエネルギー消費では空調用が半分を占めており、そのうちの半分、すなわち全体の4分の1が冷凍機やボイラーなどの熱源用であり、残りの半分は、ファンとポンプによるエネルギー消費である。住宅の冷暖房では冷暖房機器から部屋に直接吹き出す方式が普通であるのに対して、規模の大



(注) 1日の最大電力が発生した14~15時を100とした指数
図-1 電力負荷の一日の変化¹⁾

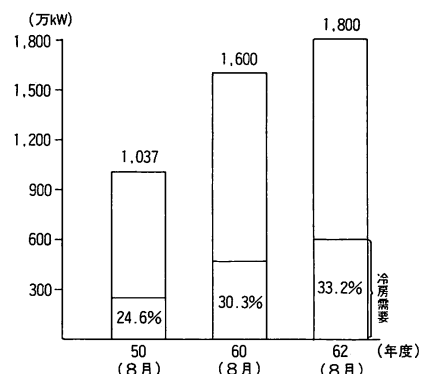
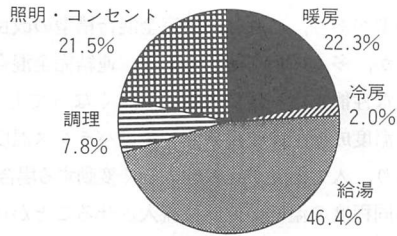
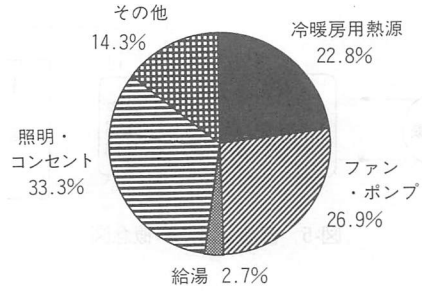


図-2 最大電力に占める冷房需要の割合¹⁾

* 三重大学工学部建築学科教授
〒514 津市上浜町1515



(二次エネルギー換算・東京郊外戸建)

図-3 住宅の用途別年間エネルギー消費量²⁾

(一次エネルギー換算)

図-4 事務所ビルの用途別年間エネルギー消費量³⁾

きいビルでは配管やダクトを通して冷温水や冷温風を運ぶためのエネルギーが大きい割合を占めることになる。また、ビルの冷暖房の特徴として、暖房より冷房にエネルギーをより多く使うこと、面積当たりのエネルギー消費量は住宅の2倍以上であること、などから考えると、真夏の日中に電力消費が最大となるのは、高校野球の所為もあるかもしれないが、ビルの冷房の影響が大きいのではないかと考えられる。

電力会社としては、このピーク電力需要量に合わせて発電所を稼働させることになる。また、今後の電力需要の増大を睨んで、そのピーク発電量を確保するために、多くの経費を使って原子力発電所を含む新設発電所の建設を余儀なくされている。しかし、当然のことながら、ピーク時期の日中以外は多くの発電所はフル稼働することなく遊んでいるわけである。電力会社としても手をこまねいているわけではなく、このピーク時間帯の電力需要を何とかして需要が少ない深夜の時間帯に回して、発電所の稼働効率を上げようとして躍起となっている。揚水発電所の建設や超伝導を利用した電力貯蔵の研究に莫大な経費を投入する一方、夜間電力を利用した電気温水器の普及、さらにはここでテーマとなっているビルの蓄熱式空調システムの普及のために様々な努力をしているのである。

2. ビルのライフスタイル

人のライフスタイルは容易には変わらない。その人の歴史的・社会的背景が大きく影響しているだけでなく、生活水準の向上に対する欲求が誰にでもあり、一度獲得した高い生活水準を下げることは困難である。私の子供時代には、冷房装置としては団扇、扇風機のみ、夕方には庭に打ち水をして、夜は窓を開け放ち蚊帳を吊るして寝苦しい夜を過ごしたものである。夏休みには早朝のラジオ体操と午後の昼寝、これは、涼し

い内に宿題をやって、涼くなった夕方に遊びに出るという生活の知恵だったかもしれない。また、冷蔵庫もなく食料を保存することができなかったので、毎日買い物に出るのが母の日課であった。

日中は冷房の効いたビルで仕事をし、夜に家へ帰れば冷蔵庫で冷やしたビールを飲み、エアコンをつけたまま就寝する。今ではそんなライフスタイルが定着しつつあると思われる。これを何十年前の生活に戻せと言っても到底無理な注文である。また、フランスなどのように避暑地で一月ものバカンスを楽しんでいる人達のライフスタイルは、せいぜい一週間のお盆休みだけの企業戦士達には夢物語でしかないであろう。

人のライフスタイルを変えるのが無理なら、ビルのライフスタイルを変えてしまおうというのが蓄熱式空調システムである。単純には、電力需要が少ない夜間に冷凍機を運転して冷水を蓄熱槽に貯めておき、日中にそれを使って冷房する空調システムである。個々のビルにとっては、若干ではあるが蓄熱に伴う熱損失があるために省エネルギーとは必ずしも言えないものの電力料金を大きく低減できるというメリットがある。また、電力会社としては、発電所の稼働効率を上げることが可能となるために、全体としては省資源・省エネルギーに貢献していることになる。

3. ビルの蓄熱式空調システム

多くのビルでは、冷凍機で5~7℃の冷水を作り、その冷水と空調機で熱交換して15~20℃にした空気を部屋に吹き出すことで冷房されており、簡単に言えば、図-5に示すように冷凍機と空調機の間において冷水を貯めておくのが蓄熱槽である。従って、従来から水をそのまま蓄熱媒体として利用するのが普通であった。水は熱エネルギーの搬送媒体としてだけでなく蓄熱媒体としても、その大きい熱容量と共に、安価で安全で

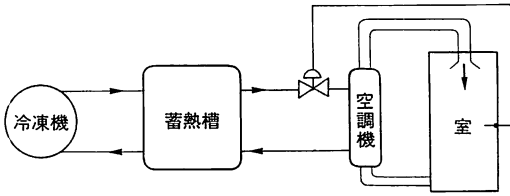


図-5 蓄熱システム概念図

あり、理想的な性質を持っている。

水蓄熱槽には大きく分けて連結槽型と温度成層型の2種類があり、そのバリエーションを含めて表1に示した。連結完全混合槽型の蓄熱槽は、個々の槽では槽内が一様温度に混合しているが、多数の槽を直列に連結することにより、全体として高温部と低温部を分離しようとするものである。わが国では従来から実績が最も多く、ビルの耐震対策として設けられた基礎構造にできる二重床の空間を有効利用して蓄熱槽とするものが一般的であり、槽数は20以上とすることが多い。温度成層型の蓄熱槽は、基本的には単独の槽で構成し、高温部と低温部をその温度差（密度差）による浮力で分離するものであり、その分離性能が優れているために今後の普及が期待されるものである。槽を構築する必要があるが、ビルの基礎構造の二重床空間利用でも水深が深くできる場合には複数の槽を並列にして利用することも可能である。なお、水は約4℃で最大密度となり、当然のことながら4℃以下の冷水を蓄えるときは、その温度範囲では温度成層が利用できない。そ

他に、温度成層型の蓄熱槽を直列に連結した連結温度成層型があり、これは連結完全混合槽型の改良型といえるが、多くの槽を連結すると、連結完全混合槽型と同様な性能となり改良の意味が無くなってしまう。また、温度成層型の改良型としてはバランス温度成層型があり、入力温度が比較的大きく変動する場合でも、槽内の同程度の温度の位置に流入させることが可能であり、形成されている温度成層部を乱さない特長がある。他にも種々の工夫を凝らした水蓄熱槽も提案されてはいるが、築造コストやメンテナンスの問題などでわが国では一般的ではない。

最近、蓄熱媒体として水を利用する蓄熱システムが注目されている。水蓄熱システムでも蓄熱媒体は水であるが、冷房時における蓄熱量の増大を図るために水が相変化する際の潜熱を利用する。そのため同じ蓄熱量の水蓄熱槽に比べて槽の大きさを1/3～1/10にすることができるという大きい特徴がある。ただし、暖房用に温水を貯める場合には潜熱利用ができない。また、水蓄熱の場合には5～7℃の冷水を作ればよかったが、氷蓄熱の場合には0℃以下としなければならない。冷凍機としてその分能力の大きいものを設置しなければならないため、得られた低温の冷水を巧みに使って省エネルギーを図ることが重要である。水蓄熱装置の種類を表2に示した。水の生成方法、構造等の違いにより多くの種類のシステムが提案されているが、生成方法についてはスタティック型とダイナミック型に大きく分けられる。スタティック型とは、熱交換器配

表1 空調用水蓄熱槽の種類¹⁾

No.	型 式	形状	構 造	略図 (平面・立面)
I	①連結完全混合槽型	迷 路 槽 型	最下層二重床内利用	
	②連結温度成層型		最下層二重床内利用 機械室内階間利用 独立構造	
II	温 度 成 層 型	独 立 型	③単一／並列 温度成層型	
			④単一／並列 バランス温度成層型	機械室内階間利用 独立構造
III				

表2 水蓄熱装置の種類⁵⁾

スタティック型	—	管外製氷型	—	水外面融解型(外融型)
		管内製氷型		水内面融解型(内融型)
ダイナミック型	—	ハーベスト型(氷片型)	—	
		スラリー型(リキッドアイス型)		

管の外側あるいは内側表面に接した水を冷却して氷を作る方式であり、製氷と融解が同じ場所でなされることからスタティック型と総称されている。ダイナミック型の場合は、成長した氷を製氷用熱交換器から間欠的に剥離させるハーベスト式と水溶液中に微細な氷の結晶を連続的に生成させるスラリー式とがある。一般に水蓄熱システムは水蓄熱に比べて機構が複雑であり、また、水蓄熱に比べて能力の高い冷凍機を使用しなければならないためにエネルギー消費量が増大するなどの問題があるが、蓄熱槽が小さくできるという長所を活かしユニット化してビルの屋上に設置することができることから比較的小規模なビルへの普及が期待されている。

蓄熱システムの基本構成は至って単純であり、図-5に示したように冷凍機と空調機に蓄熱槽を挿入するだけである。しかし、その設計においては十分な配慮が必要となる。一般に、冷凍機、空調機、ファン・ポンプ等の機器は、過去の条件に関係無くその時の入力に応じた出力を出すものであると考えてよいであろう。ところが蓄熱槽については、何時間も前に入力されたものを取り出すわけであるから、現在の出力は過去の入力と密接な関係を持ち、他の機器と全く異なる時間特性を持っているといえる。また、蓄熱槽の内部で多かれ少なかれ高温水と低温水が混合するために、入力した温度がそのまま取り出せるわけでもない。従って、冷凍機と空調機に単に蓄熱槽を挿入するだけの設計をしては意図通りの運転ができないことも生じてくる。空調システムの制御方式によっては、日中の冷房運転の際に蓄熱槽に返ってくる水温が冷房負荷の変動と共に大きく変動し、蓄熱槽内の温度分布が乱されるために思ったほど蓄熱できないということも起こり得るのである。まだ十分に蓄熱槽の特性が理解されていなかった頃には、蓄熱槽周りの種々の制御方式も確立されておらず、意図した性能が発揮できない蓄熱システムも多かったようであるが、今日では設計者はかなりの豊富な資料が利用できるようになったのでこのような失敗は過去のこととなっている⁶⁾⁷⁾。

4. 蓄熱システムの運転管理

ビルの空調設備における省エネルギーあるいはエネルギー有効利用を図るために、高効率の冷凍機、排気と給気で熱交換する全熱交換器、ファンの省エネルギーを図る変風量制御、各種インバータ制御や台数制御など、様々な機器や制御方式が提案されており、現在ではこれらをうまく組み合わせることにより、かなりの効果を上げることができるようになっている。これらの機器や制御方式は、それを採用すれば直ちにそれだけの効果を期待することができるが、蓄熱システムに関しては、その効果を最大限に活かすためには運転管理が重要なファクターとなっている。これは先に述べたように、蓄熱槽の宿命としてその応答時間が他の機器に比べて極めて長いことに起因しており、蓄熱システムの長所を十分に活かした運転のためには、常に一日全体の運転状況を把握しておかなければならない。これは、過去の運転状況だけではなく、未来の運転状況を予測する必要があることを意味している。蓄熱システムでは、未来の空調運転のために必要な熱を貯めておくわけであるから、必然的に未来の必要熱量を予測しておく必要があるのである。最も簡単な予測方法は前日と同じ運転状況を仮定するものであり、小規模なビルでは多用されているようであるが、天候の変化などには追従できないため、重回帰からファジィ、ニューラルネットワークまで応用した種々の予測方法が提案されている。

蓄熱システムの運転評価指標としてよく用いられているものに熱源運転の夜間移行率と呼ばれるものがある。蓄熱システムの場合、格安な夜間電力料金の適用時間帯が夜の10時から翌朝の8時までなので、一日の熱源運転時間の内のどれだけの割合が夜間電力料金適用時間帯に運転されたのかを示すのが夜間移行率である。この指標の大小が電力料金にそのまま反映されるので蓄熱システムの運転評価に多用されている。しかし、蓄熱槽の大きさに比べて空調に必要な蓄熱量が小さい場合には容易に100%を達成できるが、多かれ少なかれ蓄熱槽からの熱損失があるために過剰な蓄熱はエネルギー多消費につながる。逆に、真夏など必要熱量が多い場合には、いくら頑張ってもシステムの制約のために夜間移行率は低くならざるを得ない。したがって、単に夜間移行率だけでは運転管理の努力を評価することができないのである。種々の制約の中で夜間移行率を最大にするような努力を的確に評価できる指標

を確立することは、実際に運転管理に携わる人達の努力目標を明確に示すことになり、蓄熱式空調システムの最適運転につながっていくものと考えている。

もちろん、必要蓄熱量の予測が可能となり、運転管理の努力目標が与えられたとしても、蓄熱システムを効果的に運転管理することは必ずしも容易なことではない。蓄熱システムの特性を熟知した運転管理者であればまだしも、多くの運転管理者にとって複雑なシステムの運転管理は大変な仕事になりつつある。国際エネルギー機関（IEA）の国際共同研究プロジェクトの一環として、空調設備の最適運転と異常検知・診断システムの研究が行われてきた⁹⁾。そこでは、技術の進歩とともにますます複雑なものとなった空調システムに何らかの異常もしくは不具合が発生したときに、運転管理者の対応が困難となってきたとともに、熟練技術者の確保も困難となりつつあることを背景として、未熟な運転管理者であっても即座に対応できるように、管理システムの中に異常検知・診断支援システムを組み込む試みがなされてきた。システムに異常が発生していることを知らずに運転を継続すると機器の損傷に至ることがあるというだけでなく、快適環境の実現と省エネルギーを迫った設計であったとしても、そのせっかくの性能が活かされないことになる。蓄熱式空調システムについては日本が担当し、断熱材や水位の異常のような蓄熱槽自身の異常だけでなく、制御系の異常、冷凍機の異常、計測センサの異常などを含む蓄熱システム全体の異常の検知・診断に関する研究を行ってきた⁹⁾。今後は、機器単体の異常にとどまらず、蓄熱式空調システム全体の最適な運転を目指して、システムの運転管理に関する様々な情報が提供できるような支援システムの開発に向けて研究が継続される予定である。

5. 蓄熱システムの長所と短所

蓄熱システムを採用したときの長所と短所を列挙すると以下ようになる¹⁾。

〈長所〉

- 1) 冷凍機などの熱源の運転を、電力料金の割安な夜間に行うことで、運転費の軽減が図れる。
- 2) 空調しない時間帯にも冷凍機などの熱源を運転することにより、機器の能力だけでなく、ポンプなどの付帯設備も小さいもので済ませることができる。したがって、それらの設備費・据付面積が減少するのみでなく、受電設備の縮小、契約電力

の減少にまでおよび、これらが経済的効果となる。

- 3) 冷凍機などの熱源は、冷暖房需要の多寡に関わらず効率の高い連続運転ができる。
- 4) 空調の系統を多く持つ場合、負荷変動が大きい系統を持つ場合、運転時間帯が異なる系統を持つ場合には、蓄熱槽が緩衝体の役割を果たし、バランスの良い運転ができる。
- 5) 熱回収システムの採用により省エネルギーの可能性が大幅に拡大する。

〈短所〉

- 1) 蓄熱槽を別に構築する場合はその構築に費用がかかり、断熱・防水工事も必要となる。
- 2) 蓄熱に伴い蓄熱槽から熱損失が生じる。
- 3) 蓄熱配管系が余分に必要となるので、その配管設備費、搬送動力費が追加される。
- 4) 地下に蓄熱槽がある場合には、汲み上げるための能力を加算したポンプが必要となり、設備費、搬送動力費が増加する。
- 5) 蓄熱槽内での混合に伴う水温上昇のために、空調機やポンプの能力を増大させなければならないことがある。
- 6) 蓄熱運転のための自動制御・監視が付加される。また、水質は水槽構築材料によってはpH調整などの水処理が必要なこともある。
- 7) 夜間の熱源運転による近隣への騒音に配慮が必要な場合がある。

以上のように、蓄熱システムの採用により多くのメリットを享受することが可能となるが、半面、種々のデメリットをうまくカバーしなければ折角のメリットが相殺されることになりかねないので注意が必要である。また、先に述べたように設計に数々の工夫を盛り込んでも実際の運転管理でそれが活かされなくては意味がないので、既存の蓄熱システムまでも視野に入れた最適運転を可能とするような運転管理支援システム開発のための研究努力が続けられているのである。

6. おわりに

蓄熱式空調システムは、電力需要の平準化に大きく貢献できることから、電力会社を中心としてその普及のための様々な努力がなされてきている。しかし、一般に広く普及させるためには、単に電力料金の割引制度による経済的メリットを喧伝するだけでなく、それが最終的には省資源と省エネルギー、そして地球環境の保全につながっていることを認識しつつ、設計資

料の充実と運転管理の支援のための様々な研究が根気よく継続されなければならないと考えている。

参考文献

- 1) 田中貞夫：リキッド式氷蓄熱空調システム，電力と建築設備，建築設備電力委員会発行，No. 7 (1988)，68～77
- 2) 澤地孝男・坊垣和明：住宅における用途別エネルギー消費量の推計，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1994)，571～572
- 3) 中原・島貫・後藤・相良：各種建物のエネルギー消費量など調査結果，空気調和・衛生工学，58-11 (1984)，57～67
- 4) 中原信生：空調用蓄熱システムの概要と省エネルギー性について，IBEC，住宅・建築省エネルギー機構発行，No. 93，Vol.16-6 (1996)，5～11
- 5) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧第12版，2 汎用機器・空調機器，第4編 第3章 蓄熱装置 (1995)，486～503
- 6) 蓄熱式空調システム 基礎と応用，空気調和・衛生工学会 (1995)
- 7) 建築・設備の省エネルギー技術指針，8.6 蓄熱システム，空気調和・衛生工学会 (1994)，156～175
- 8) 中原信生：ANNEX25対応研究委員会の研究状況について，IBEC，住宅・建築省エネルギー機構発行，No. 80，Vol.14-5 (1994)，40～48
- 9) ビル管理システム及び最適化と検知・診断システム，BEMS/BOFD講演会テキスト，住宅・建築省エネルギー機構発行 (1996)

協賛行事ごあんない

「二酸化炭素の海洋貯蔵に関する 国際シンポジウム」について

〔主催〕新エネルギー・産業技術総合開発機構，

IEA/Greenhouse Gas R&D
Programme

〔開催日〕1996年10月31日(木)～11月1日(金)

〔場所〕京王プラザホテル4階「錦」の間

〔会議使用言語〕英語 (同時通訳付き)

〔主要トピックス〕

- ・化石エネルギーからのCO₂低減シナリオ
- ・海洋貯留の実施に伴う地球環境への長期的な効果と影響

・海洋貯留の技術的展望

・各国専門家によるパネルディスカッション

〔参加予定〕7ヶ国 200名

〔参加申込締切〕10月11日(金)

〔申込先〕〒170 東京都豊島区東池袋3-1-1

サンシャイン60 29階

新エネルギー・産業技術総合開発機構

環境技術開発室 林 一郎

TEL 03-3987-9368 FAX 03-5391-1744