



# 空調技術の魅力再考 —半世紀の歩み回顧から将来への展望まで—

環境システック中原研究処代表 名古屋大学名誉教授 中原 信生

はじめに

本稿は、中部支部設立 50 周年を祝し、本年 6 月に開催された支部報告会にてほぼ同名の記念講演を行ったものの1を、紙数に合わせて抜粋し、なお、将来展望を補足して再構成したものである。

初めに空調技術の魅力の原点は奈辺にあるかを述べる。それは人間・環境・資源・エネルギーの相互依存、循環関係、省エネルギーの意義の深掘り、並びに建築及び建築システム性能実現に対する生産・維持管理プロセスの非貫流性である。次いで筆者自身の経験に基づき、空調技術の魅力が負荷変動に対するシステムの不連続な応答性にあり、対象に応じて最適性追及の余地が数多く存在すること、年間の負荷と環境変動に対する制御の適正化が技術者の興味と探求心をそそること、その代表的なテーマとして環境分布を適正にする空気分布課題と、空調システムの省エネルギー化の追及へと直結した蓄熱システムの高効率化のプロセスを述べ、研究・開発の成果、エネルギーと環境の背景、機器の性能向上などがいかに設計内容に影響するかを示したい。講演には含まれた、自動制御/BEMS/最適制御の展開と国際活動、汚染制御と自然エネルギー利用の最適化に工夫を凝らした病院空調システム、冷房に焦点を当てたソーラーシステムの最適化のプロセスについては、紙数の関係で割愛した。

次に 21 世紀を迎えるに当たって筆者が展望した環境システム課題をレビューし、その中から高齢者環境を、また防災対応環境への取り組みの必要性を述べたい。さらに AI/IoT の追及が、適応制御レベルの環境最適化制御や故障検知診断の質を飛躍的に高めるであろう、その正しい適用こそが空調技術の魅力さをさらに高め、問題解決に役立つことであろう。

## 1. 空調技術の魅力の原点

### 1.1 環境循環

図 1 に空調技術の展開の原動力となる、人間—環境—資源・エネルギーの循環関係を示す。人類が生存環境の向上を求めて環境調整技術を展開するにつれ、資源・エネルギーの消費と枯渇が顕著となり、生存環境が汚染され、より高度の技術と資源・エネルギー消費となって地球環境汚染が進み…という左回りの循環が加速し、環境の許容量を超えて破局に向かおうとする。エントロピー増大の原理により逆回転はあり得ないから、この循環速度を少しでも遅らせねばならない。

### 1.2 省エネルギーの意義と省エネルギー技術プロセス

それを充足させるのが省エネルギーであり、省エネルギーの意義は「反省」→「省察」→「節約」から成ることを理解すれば技術の方向性が定まる。図 2 に示すように反省すべきは環境と資源・エネルギーの行く末、省察すべきは真なる省エネ技術であり、その原理は図 3 に示すとおりである。節約の実現はシステムの適正運転保守、適切な環境制約値の下のエネルギーミニマムを追求するこ



図 1 環境循環原理

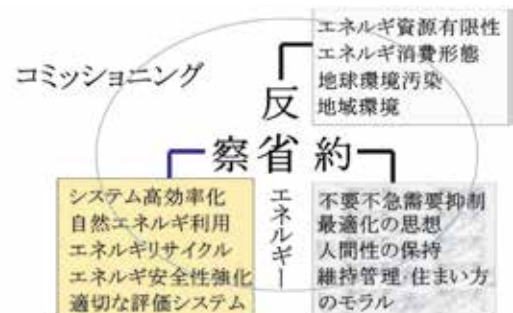


図 2 省エネルギーの意義

と、そのためには人間側の住モラルと他人・他物を慮るヒューマニズムがバックボーンとなる。

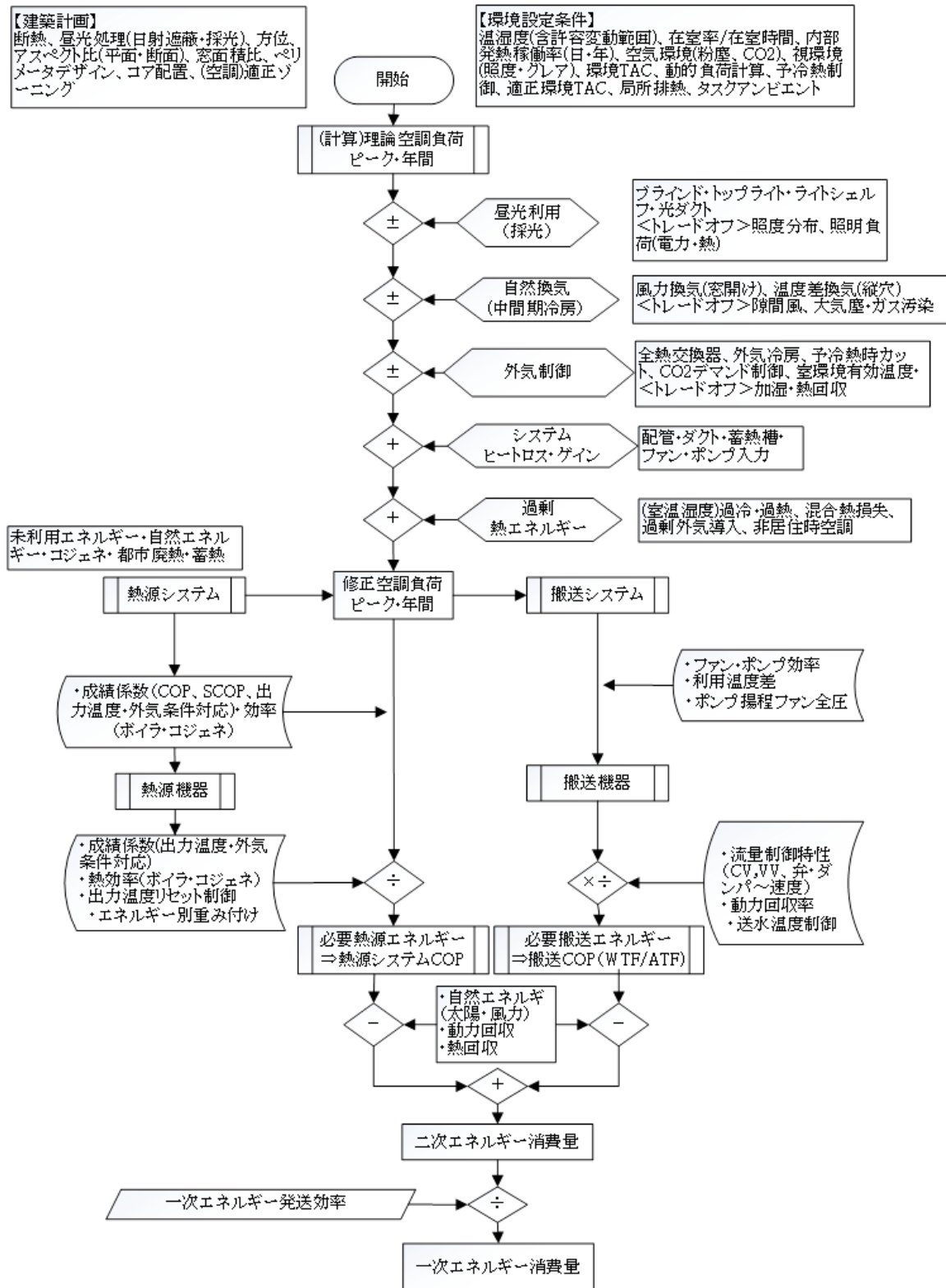


図3 省エネルギー設計と評価のプロセス

### 1.3 コミッショニングプロセス

省エネルギーを全うさせる建築の生産から運転保守における必須のプロセスがコミッショニングである。コミッショニングは建築主が建築意図を固める段階から始まり、建物所有者となって省約を実現するに必須なもので、FM(ファシリティーマネージメント)と協調せねばならない。少し見難いが図4に示すライフサイクルコミッショ

ニングを適用することによって図5のように目標値を永続的に守り、さらに時代の要請にこたえて目標値の調整、合理的な更新計画へと進む。

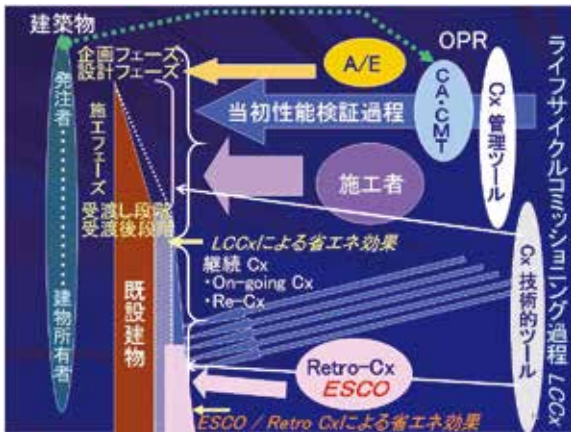


図4 ライフサイクルコミッションング

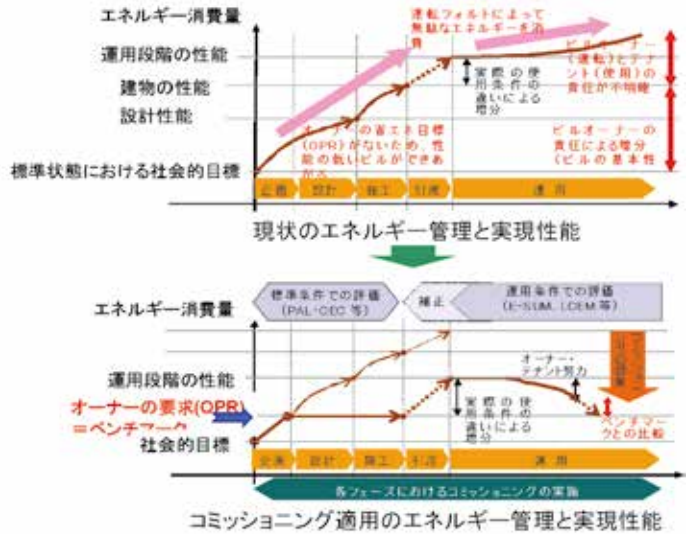


図5 コミッションングプロセスの効果

## 2. 魅力を伝えるトピックス

### 2.1 空気分布<sup>2</sup>

この半世紀の前半を暮らした者にとっては(特に 1960 年代からこの技術に携わった者にとって)空気分布設計とダクト計算は空調技術の象徴であった。今やCFDの普及によって空気分布設計の難点は解消したかに見える。然し以下の筆者の体験を読んでもらえば、年間の環境変動に対する、物理法則に基づくマクロな現象把握に基づく解析ないし展望を怠れば必ずや誤った設計に陥るであろう。

#### (1) 鉛直吹出し温風の到達

温風単独、或は冷温風切り替えの鉛直吹出しにおける吹き出し温度と風速の選択問題である。Koestelほかの有名な研究により自由空間の軸流吹き出し口の到達距離と落下距離が整理されている。温風鉛直下向き吹き出しの軸心速度が居住域高さで残存速度(例えば 0.5m/s)になるように設計する。

$$\frac{v_x}{v_0} = K \frac{d_0}{x} \left\{ 1 - 1.9 \frac{A_r}{K} \left( \frac{x}{d_0} \right)^2 \right\}^{1/3} \quad A_r = g\beta\Delta t_0 d_0 / v_0^2$$

#### (2) 空気分布設計のステップアップ

##### 1) K大学講堂暖房の場合(1964年竣工)

システム(図6)：蒸気加熱コイルを持つ空調機を居住域に設けた温度センサーにて蒸気弁を操作。  
不具合：朝の暖房開始時から室温が上昇せず図の①のような温度分布になる。

診断と対応：立ち上がり時の室温偏差で蒸気弁が

全開、余裕ある蒸気コイルが全力で作動し吹き出し温度が高温化して到達距離が狭まり温度成層化した。吹き出し温度ハイリミットをもうけて所定の吹き出し温度を超えないように制御を加えた。但し必要吹き出し温度は負荷と共に変動するので、ピーク負荷に対応するハイリミットではほとんどの季節に対して適合せず、通常のプロportion制御では十分な対応性が得られないから季節対応の手動弁調整等が必要となる。

得られた教訓：コイルの特性、自動制御の動作特性、立ち上がり時及び部分負荷時への配慮の必要性、輻射暖房の効果と必要性(本例では床輻射暖房は無し、図は推奨としての仮定)、これらの教訓より引き続いたプロジェクトにおいて2)以下の配慮を施した。

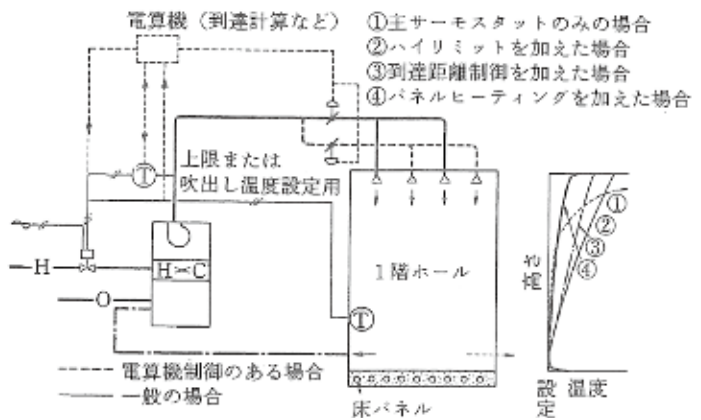


図6 K大学ホールの温風暖房システムと制御

2) M 恒温工場冷暖房(1968 年竣工)

システム：前例の教訓、及び恒温室であること、冷暖房切り替えであることを配慮して、

①ファンエネルギー低減のため、軸流誘引型吹出し口を開発適用。

②冷風時は自然落下するので風量、風速とも減らす。

③温風時は自動制御により温風で吹出し温度が制御されるが、季節変動に対して変動する吹き出し温度差により風量と風速を変動させるべく、図 7 に示すスケジュールでダンパ制御。

性能検証：図のような温度分布を得、居住域の室温制度も満たされた。

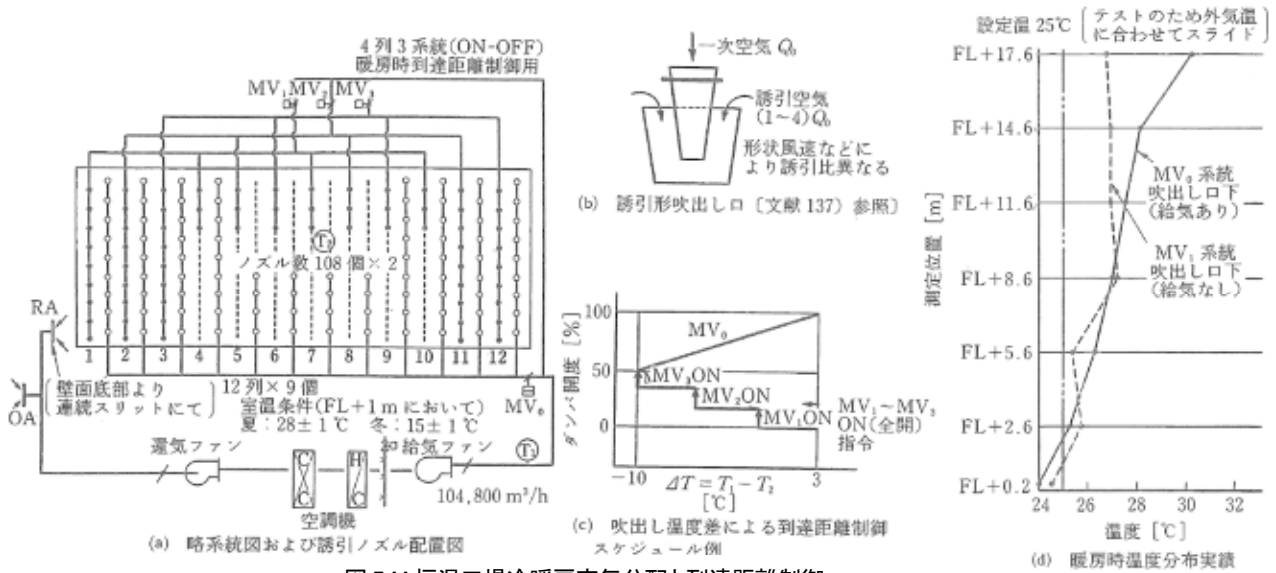


図 7 M 恒温工場冷暖房空気分配と到達距離制御

3) 万博 M 館居住域冷房<sup>3</sup>(1970 年竣工)

システム：前例までの教訓と経験を活かしつつ、かつ、冷房のみであることを考慮して、

①中央単一出し口とし、軸流膜冷房と輻流型誘引居住域吹出し(図 8)を候補として考察した。

②空気分布を Ar 数基準の相似則に基づく模型実験を実施して設計変数を定めた。

③輻流方式により居住域空調(冷房)を目論んだ。

性能検証：模型実験結果を、実運転中に実測検証を行い、予測精度を検証した。誤差は概ね 0.5℃であった。

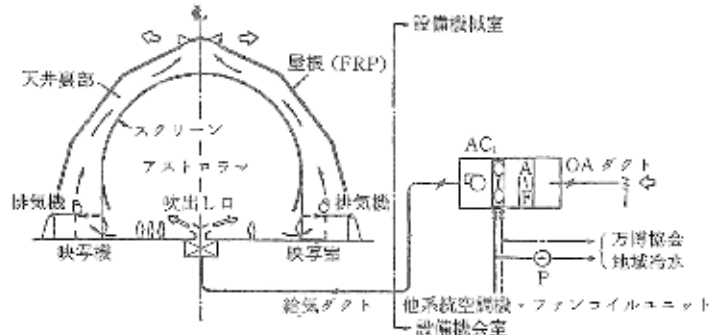


図 8 万博 M 館居住域冷房システム

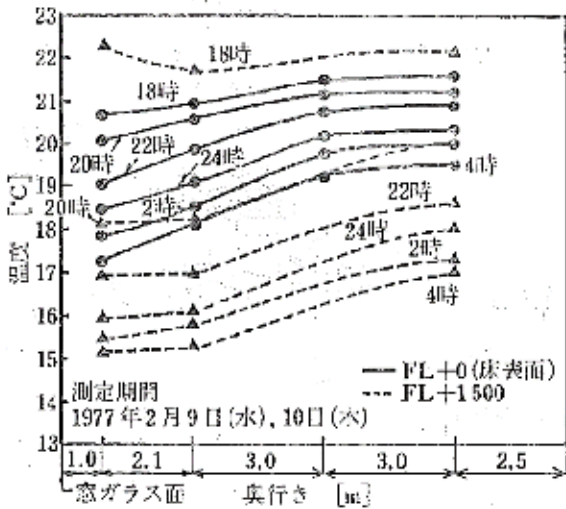
(3) 空気分布(分配)の課題から他テーマへの波及

1) インテリア冷房負荷上の問題把握<sup>4</sup>→夜間室統合動的負荷計算の必要性

プロジェクト：大阪大林ビル(1973 年竣工)

システム：インテリア系統は全空気モジュールごとブースターコイル制御方式。ペリメーターは奥行き約 1.5m の水一空気(FCU)方式でオンオフ二方弁制御。熱源は複槽蓄熱式熱回収ヒートポンプ方式。

熱回収実績の検証：冬季にインテリア発熱の熱回収量が定常負荷計算による期待値より極端に少なく、夜間室温変動の計測結果(図 9)から、P/I 分離定常負荷計算の不合理に気づき、折から学会より発表された動的負荷計算 MicroHASP で夜間は P と I がある割合で統合して室温変動計算をする方法を開発(1980 年以降名大)。図 10



←図9 大阪大林ビル夜間室温・床面温変動

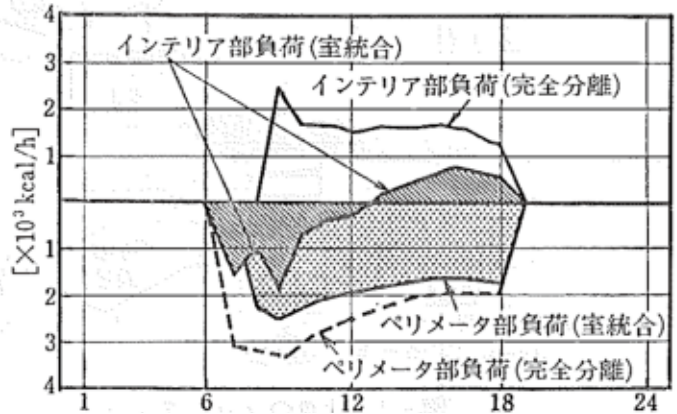
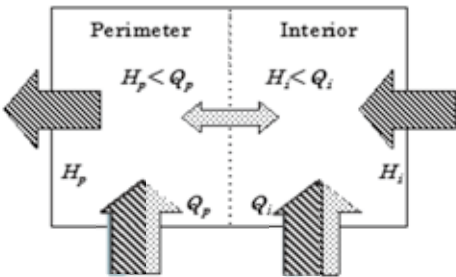


図10 大阪大林ビルP/I統合後負荷(計算値)

は夜間統合ロジックの有無による計算結果の比較を示す。

2) 混合エネルギー損失<sup>5</sup>の発見

上記のプロジェクトにおいて、冬季夜間室統合を考慮して尚ペリメータ暖房負荷が理論値より過大であることから、過剰なペリメータ供給温熱とインテリア供給冷熱が互いに打ち消し合って無効エネルギー損失を招いていることに気付き、室内混合エネルギー損失の原理と予測式の同定を実物大実験により行った(1980年以降於名大)。図11にこれを示す。最大の影響因子はP/I設定温度差であり、P域をI域より低く設定すれば損失ならぬ利得を得る。そこで改めてP域室温を下げるための輻射パネル設置が省エネルギーのための有用な手段であることが浮き彫りにされる。図12は混合損失の大きいシステムと小さいシステムの典型像を示したものである。なお、図中の設定温度はオイルショック当時の推奨設定温度を基準にしており、敢えて修正はしていない。



$$ML = (Q_p + Q_i - (H_p + H_i)) = (Q_p - H_p) + (Q_i - H_i) = ML_p + ML_i$$

$$MLR = ML / (H_p + H_i)$$

実験式(P/I間: P暖房+I冷房, I冷房+I暖房, I/I同士: 冷or暖)

$$P/I間: MLR = 31.281 SPD + 0.053 FCH + 2.469 IACR - 29.157 [\%]$$

$$I/I同士: M = 126.9 \alpha WH^{3/2} |SPD|^{3/2} [\text{kcal/h}]$$

$$\alpha = 0.137 |SPD| + 0.014 LP + 0.015 IACR - 0.159$$

P:ペリメータ, ML:混合熱損失, MLR:混合熱損失率(%), I:インテリア, H:必要熱量(負荷), Q:処理(供給)熱量, SPD:P/I間またはI<sub>1</sub>/I<sub>2</sub>間設定温度差(I<sub>1</sub>/I<sub>2</sub>は隣り合うインテリアゾーン), FCH:外壁単位幅当り負荷(kcal/h/m), IACR:インテリア換気回数, M:インテリア(冷房同士)ゾーン間混合熱量(負荷分担修正熱量, kcal/h), W:ゾーン境界幅(m), H:天井高さ(m), LP:吹出口とI<sub>1</sub>/I<sub>2</sub>境界面との距離(m)

図11 室内混合エネルギー損失、定義と予測実験式

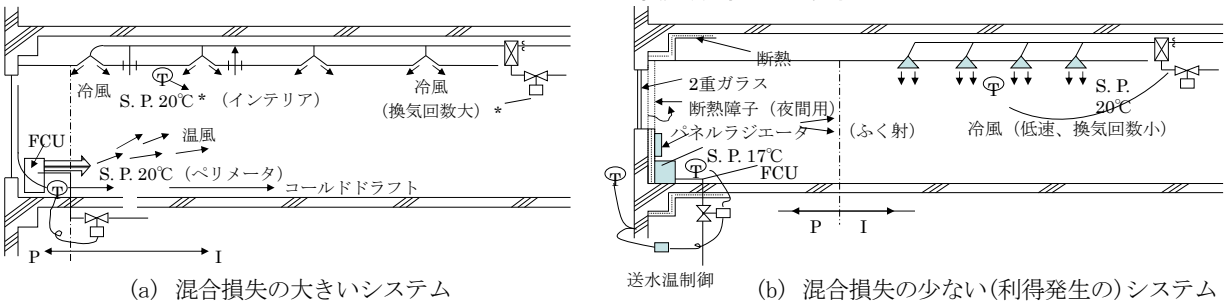


図12 室内混合損失の大きいシステムと少ない(混合利得を発生する)システム

3) 温度成層型蓄熱槽の混合モデル<sup>6</sup>との類似性から天井温風吹出し、床冷風吹出し混合モデルへ

このような研究を進める中、同時期に温度成層型蓄熱槽の混合モデルを作る実験に取組み(1980年以降於名大)、Ar数で整理される「完全混合+押し出し+分子拡散の組合せ混合モデル」が、R値モデルとして確立され、室内空気分布の問題と関連付けられることが判った。

温度成層型蓄熱槽の R 値モデル：図 13 に示すように入り口側の完全混合域と出口側の温度成層(ピストンフロー)域及びピストンフロー域内の分子拡散との組み合わせから成る。1 日単位の水蓄熱の場合は分子拡散の影響は無視できる。突入噴流の先端はこの完全混合域深さの 2 倍まで達し、槽深 L まで達すると(即ち完全混合域が半分の深さになると)底面のコアンダ効果(附着流)の影響で槽全体が完全混合域になり、R 値は 0.5 から一挙に 1.0 に飛ぶ。

上部温風吹出し気流の居住域への到達問題<sup>7</sup>：2.1 で述べた Koestel の式は自由空間における軸流吹出しの気流到達問題であり、大空間で上部ノズル吹き出しの場合はこれが当てはまるが、限定されたサイズの閉空間の場合は対向壁面(或は対称的に設置された吹き出し口の守備範囲の境界)の影響が強く、まさに R 値モデルの適用が可能であり、居住域まで完全混合するように Ar 数を定める  $\psi$  値モデルとして設計資料を整理した(図 14)。

床冷風吹き出し気流の居住域限定混合域モデル<sup>8</sup>：これとは逆に、同時期に一世を風靡したインテリジェント空間の床吹き出しシステムは居住域空調効果によって人体に良好な環境を保持し、タスク域に集中した空気分配を行うことが可能であり、人の居ない上部は喫煙流の逃げ場所を兼ねた排気空間として放置できる。したがってこの場合は R 値モデルの完全混合域深さを居住域高さに限定すればよい。この場合を  $\phi$  値モデルとして整理することができた(図 15)。

何れの場合も負荷は変動するが、ピーク負荷に対して設計しておけば負荷変動は温度差の低下、したがって完全混合域の増加になるので到達の観点からは問題ない。

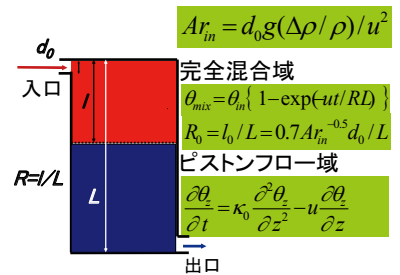
## 2.2 蓄熱システム

蓄熱システムもまた筆者にとってのライフワークの一つであった。実プロジェクトの蓄熱システムの施工現場体験、さらに本学会の会誌論文で柳町政之助氏の蓄熱哲学に鼓舞され、NHK 大阪放送会館新館の設計・施工・性能検証に始まる蓄熱槽効率への開眼と予測手法の開発、モデル化、シミュレーションプログラム、そしてヒートポンプ・蓄熱センターでの水蓄熱技術基準の体系化を終えるまで 55 年に亘る付き合いの中で、前記の流れの分布と到達に関する知見、ソーラーシステムとの組み合わせたバランス式温度成層型蓄熱槽の開発、非蓄熱システムとのエネルギー効率競争性を高めるために工夫した大温度差・変水量システムの導入、コンピューターコントロールによる蓄熱最適化制御などの省エネルギー・最適化手法が生み出された。

### (1) 水蓄熱システムの基礎知識

#### 1) 蓄熱水槽の型

図 16 に典型的な蓄熱水槽の型を示す。工夫の目的はピストンフローの実現であり、前世紀の主流は多



$d_0$ : 入口口径、 $\rho$ 、 $\Delta\rho$ : 冷温水の密度、密度差、 $u$ (混合域): 流入速度、 $\theta$ : 水温、 $\theta_m$ : 完全混合域深さ、 $L$ : 槽深、 $\kappa_0$ : 拡散係数、 $u$ (押出域): 移動速度

図 13 R 値モデル

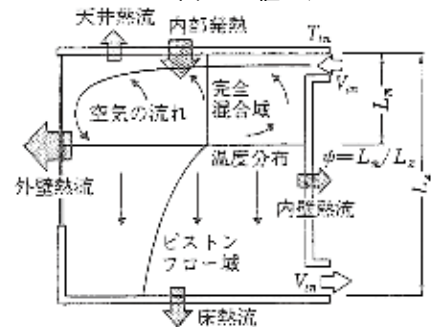


図 14  $\psi$  値モデル

$$L_m / D_0 = 0.4 Ar^{-0.622}$$

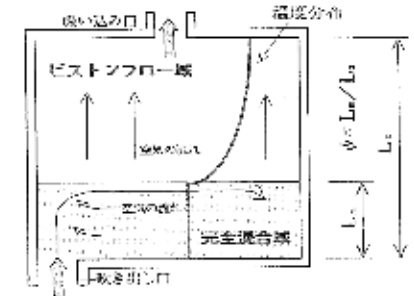


図 15  $\phi$  値モデル

$$L_m / D_0 = 0.56 Ar^{-0.5}$$

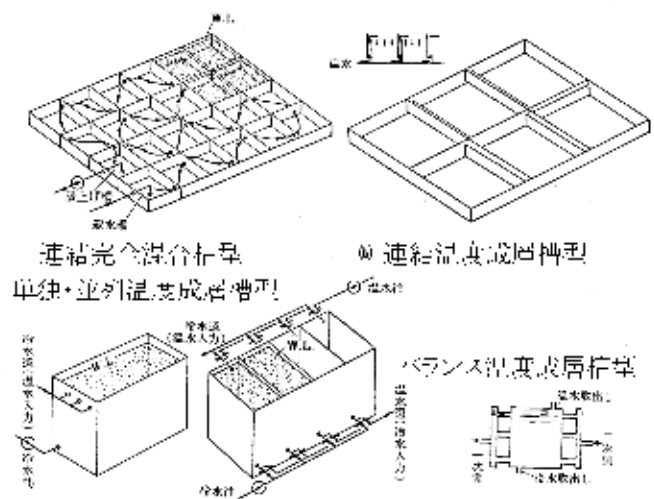


図 16 蓄熱水槽の型式

槽連結型、今世紀になってからの主流は温度成層型である。

## 2) 蓄熱運転モード

図 17 は典型的な蓄熱運転モードを示す。(1)が初期投資と省エネルギーをバランスよく追及する方式で、電力料金体系変動にも対応しやすい。(2)は連続高負荷建物の熱源機稼働率低減を目的としたもの、(3)は廉価な夜間電力をフル利用する方式、(4)は主に氷蓄熱向きの既設ビルのリニューアル対応型である。

## 3) 蓄熱温度プロフィール

図 18 に示したような図を温度プロフィールと呼び、図では運転開始時と終了時のプロフィールのみ上下に描かれている

(その間に囲まれる面積が蓄放熱量になる)が、実際にはその中間時刻のプロフィールが書き込まれる。この温度プロフィールは蓄熱槽の特性解析に重要な役割を演じる。

## 4) 蓄熱槽効率と熱源機・蓄熱水槽容量計算

熱源機容量  $G$  と蓄熱槽容量  $V$  は図 18 内の式で計算する。熱源機は全負荷運転が原則、蓄熱槽容量を支配する重要な要素は利用温度差  $\Delta\theta_0$  と蓄熱槽効率  $\eta_{st}$  つまりその積である有効温度差である。

$\eta_{st}$  は図のように、蓄熱槽水量と設計上のコイル温度差  $\Delta\theta_0$  との積である名目蓄熱量と、ピーク負荷時における実際の温度プロフィールから計算される実際蓄(放)熱量の比率から求められる。この実際温度プロフィールの制約条件は送水限界温度と熱源入口限界温度、前者は二次側空調機のコイル設計温度からの制約、後者は一次側冷凍機チラー出口の凍結防止温度の観点からの制約(冷凍機は全負荷運転、即ち容量制御は行わないのが原則)である。

### (2) 蓄熱システムの特性解析とプロトタイプ、省エネルギー化のステップアップ

#### 1) 大阪放送会館新館<sup>9</sup>(1963 年竣工)

システム：一次側は複槽蓄熱熱回収電動ヒートポンプ方式、2 次側は空調機とファンコイルユニット(FCU)。熱源システムは全自動運転化を目指し、制御シーケンスを自作、動作ナラティブ(文による動作説明)を作成。将来的には自動制御管理文書として定型化された(本文からは省略)。

蓄熱制御：蓄熱システムの必須の制御は、①(一次側)定温蓄熱制御(吸込み三方弁制御)、②(二次側)大温度差還水制御、③熱源起動停止制御である。①は柳町氏の知見を受け継いで法則通りに実行、②はこの時点では空調コイル制御は三方弁定流量制御が鉄則であったので、図 19 のようなブリードイン型の、空調機コイル循環ポンプのバイパス制御を採用し、弁の両ポートを均圧化させるために汲み上げマスターポンプというのを設置して余剰水は始端槽に還水させた。このポンプにはフート弁を用いない立型水中ポンプとして水の落下を防いだ。③については満蓄熱制御とし、始端槽の限界温度によることとした。

性能検証：温度プロフィールの実績例を図 20 に示す。これより、①ブリードイン制御は定温度差還水に一定の効果があるが完全ではない、②温度プロフィールが蓄熱特性を表す、③温度プロフィールのモデル化が必要、④満蓄制御は適正か否か、などの気づきがあり、まずは温度プロフィールのモデル化に着目し、図 20 のような  $n$  次曲線を対照的に組み合わせたと  $\xi$  値モデルを考えたが、この  $\xi$  値と設計手法との因果関係が不明で実用に至らなかった。

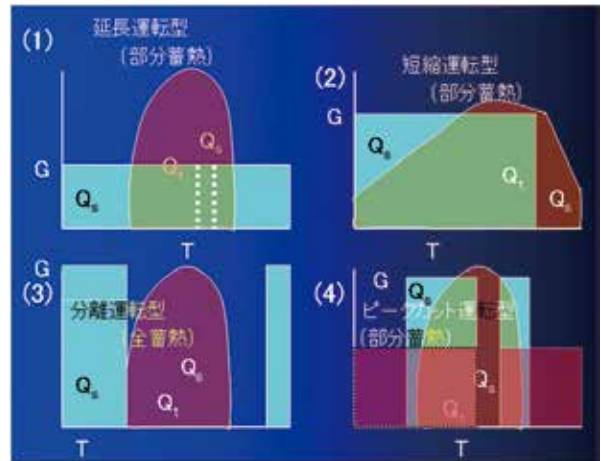
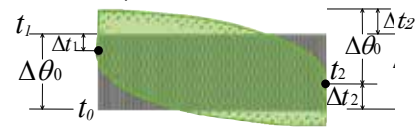


図 17 蓄熱システムの運転モード



$$G = \frac{Q_s}{T \cdot \varepsilon} (1 + \alpha)$$

$$V = \frac{Q_s}{\Delta\theta_0 \cdot \eta_{st}} \quad \eta_{st} = \frac{\text{Actual Storage}}{\text{Nominal Storage}}$$

$T$ : 蓄熱運転時間、 $Q_s$ : 必要蓄熱量、 $\alpha$ : 槽熱損失率  
 $\varepsilon$ : 熱源負荷率、 $\Delta t_1, \Delta t_2$ : 1 次側、2 次側限界温度

図 18 熱源と蓄熱槽容量計算式と蓄熱槽効率

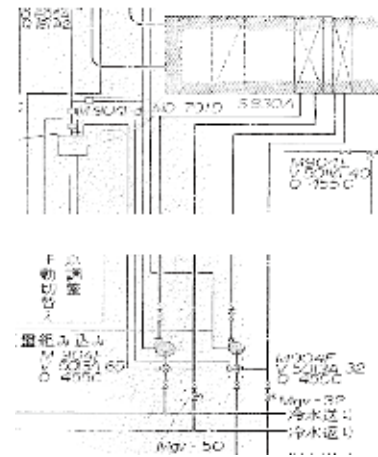


図 19 ブリードイン型三方弁制御

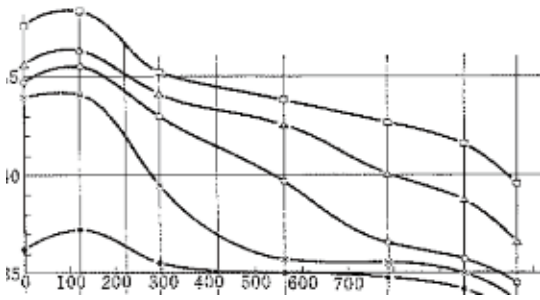


図 20 NHK 温度プロフィール例

2) 大阪大林ビル<sup>10</sup>(1973 年竣工)

無公害ビルを標語とした当ビルの空調設計目標は低公害・ミニマムエネルギー・最適化ビルである。

システム：熱源は電動ターボ+ガスエンジン駆動ターボ複槽蓄熱熱回収ヒートポンプシステム、空調は 2.1(3)1)にも述べたように、ペリメータゾーンは 2 管式ファンコイルユニット、インテリアゾーンは全空気モジュールブラスターコイル方式で高度空ろ過システム、熱源及び空調システムに対して最適化制御を開発適用した。ここでは蓄熱関連事項のステップアップについてのみを述べる。

空調機二方弁変水量制御システム：省エネのために二方弁制御の活用を思い立ち、動作実験を行って支障ないことが判明したので全面採用し、その結果は後日、当学会の省エネルギー指針に組み入れることにより一般化の道を辿るようになった。但しポンプはインバーターが高価であったのでこの時点では台数制御に頼らざるを得なかったが、指針化の中で数多くのシミュレーションによりポンプ VVVF 制御手法によるエネルギー効率比較がなされ、インバーターの普及と低価格化への道を開いた。

大温度差コイルの採用：蓄熱水槽の極小化、水搬送エネルギーの低減のために従来常識の 5°C 温度差に対し、13°C 温度差としても制御上の問題もないばかりか、低負荷時により一層の大温度差を得られることが判り、この値を採用した。ファンコイルユニットに関しては自由にコイル列数を選ぶことができないので従来値を採用しつつ、将来の在り方と大温度差低流量ユニットの開発を懸念するだけに留まった。

ファンコイルユニットの風量・水量制御：蓄熱槽に対してファンコイルユニットの小温度差還水が致命傷であることが判っていたので、せめて定格温度差は確保すべきと、①手動速度制御(H/M/L)の取り外し、②電磁二方弁を各スパン(2 台)単位に取り付け、によって通水時の定格温度差確保、停止時のバイパス流防止を狙った。なお、これもその時点では提案に留まったが、商用の小流量比例制御二方弁の開発が数十年後に開発されるに至った。

コンピューターコントロールによる蓄熱最適運転制御：汎用制御用に開発されたばかりのミニコンピュータを空調制御(DDC+OPC)を適用した。蓄熱関連に限れば以下の計算制御を適用した。

② 負荷予測(カルマンフィルター)と蓄熱余量推定(温度プロフィール推移推定による)熱源最適運転制御

② トータルシステム成績係数(1 次側+2 次側)

に基づく、最適蓄熱温度の同定

③ 熱回収運転時のヒートポンプサーージング防止のための冷媒バイパス制御の最適化

④ 熱回収空調機の最適選定

①により満蓄制御で生じる過剰熱損失の防止を、②③によりヒートポンプの運転 COP の向上を、そして④により過剰熱回収の防止と温水蓄熱/冷却塔放熱の最適切替えを図った。

3) 蓄熱シミュレーションによる蓄熱槽効率推定表作り(名古屋大学 1980~1990)

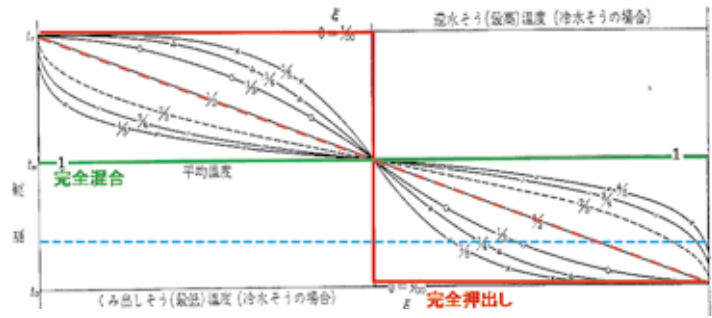


図 21 温度プロフィールの値モデル

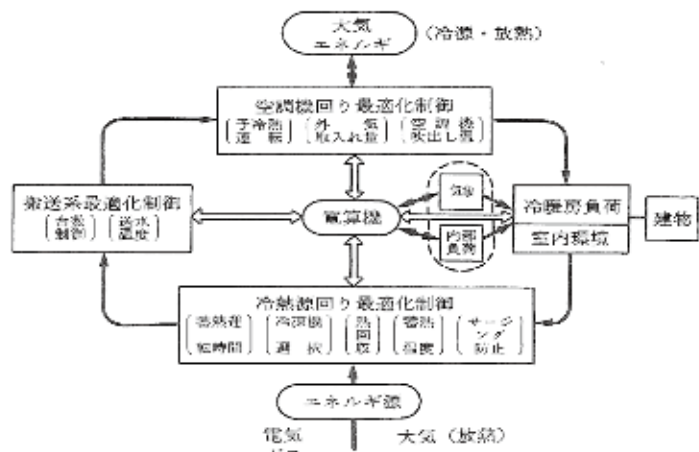


図 22 大阪大林ビル最適化制御の構造



図13に示したような、温度成層型、バランス温度成層型蓄熱槽の実験結果から得たR値モデルを軸に、図16に示した各種型式の蓄熱槽の運転シミュレーションプログラム(TESEP-W、氷蓄熱用プログラムはTESEP-ICE))を作成し、実験計画法を用いて繰り返し計算を行い、実用的な蓄熱槽効率推定表を作成し、柳町氏が懸案のまま課題として残した蓄熱効率を、容積効率であるので蓄熱槽効率と再定義し、有意な設計要因(例えば連結完全混合型蓄熱槽の槽数や負荷パターン、VWVかCWVか等)A~Iの水準1~3を選んで組み合わせたときの蓄熱槽効率が求められ、設計段階で最も蓄熱槽効率の高い(言換えれば最も小さな容積の蓄熱槽で省エネ性の高い)蓄熱システムを構築できるようにした。図23は上記の計算結果の一部6ケースの熱量プロフィールと水温のプロフィール、並びに計算結果の特性値を示したもので<sup>11)</sup>、選び方によって大きな差が生じることが判る。

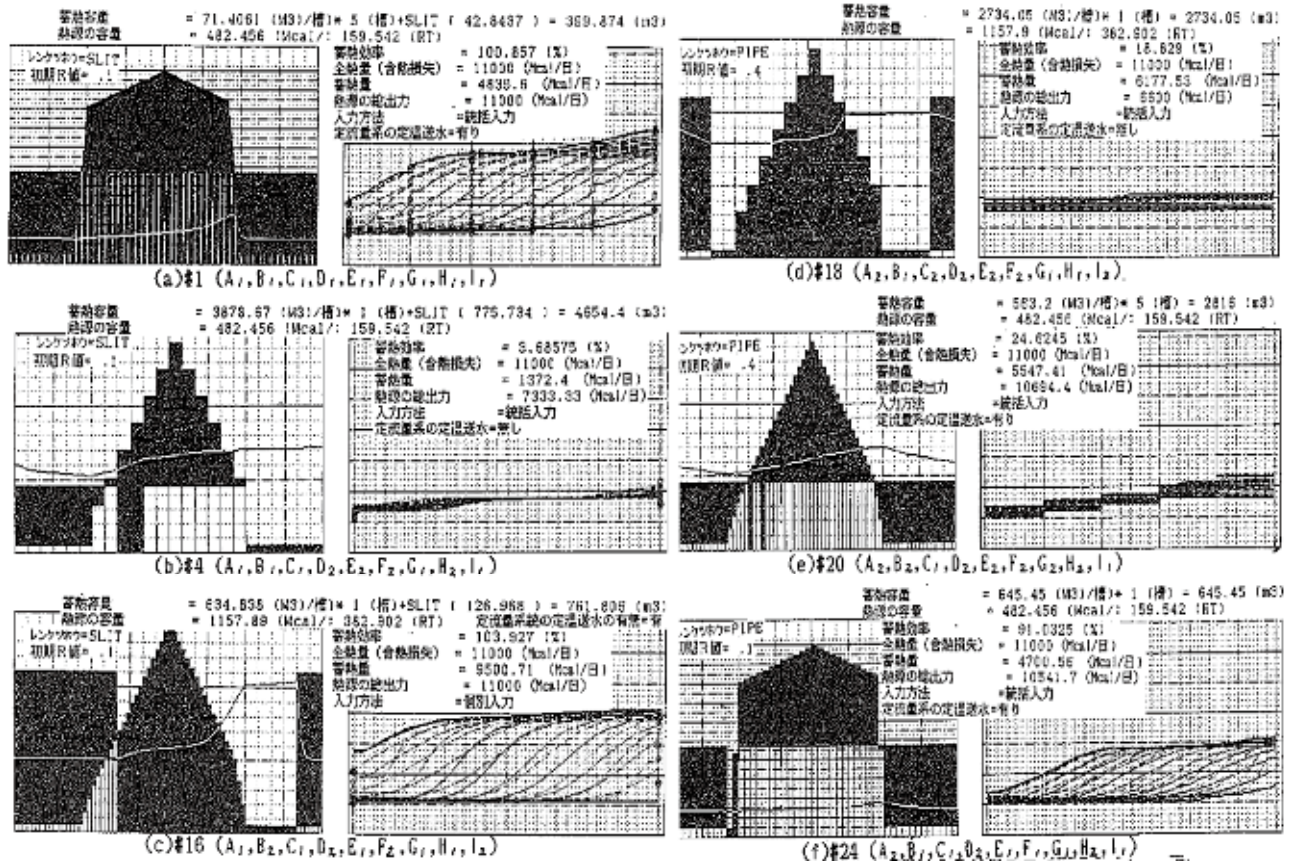


図23 TESP-Wを用いた実験計画法による蓄熱槽効率推定表作成計算結果の一部

#### 4) ヒートポンプ・蓄熱センターでの水蓄熱技術基準の体系化<sup>12)</sup>(1997~2015)

1990年代後半になって電力供給不足が急速に高まり、電力ピークシフトを可能とする蓄熱システムの有効性が国家的に認識され、夜間電力料金の低価格化により蓄熱システムの普及が図られた。そこで導入が推奨されたのが図17の(3)(4)の運転パターンである。尤もこれらモードは蓄熱槽容量の小さくなる氷蓄熱向けである。ヒートポンプ・蓄熱センターが蓄熱のナショナルセンターと位置付けられて、水及び氷蓄熱の蓄熱技術基準を整備し、講習会、セミナー、研修会を開催して蓄熱システムの普及の役割を担うこととなり、筆者は招聘されて水蓄熱システムの基準化とマニュアル作成のための委員会を運営し、約20年にわたり歳月を費やして20冊余のマニュアル(設計例、コミッショニングを含む)と3種類のシミュレーションプログラム(うち一つは前記 TESP-WをN88BasicからVisual Basicに書換え、Windows上で動作するTESEP-W)、4種類のツール(コミッショニングプロセス管理ツールを含む)が整備された。詳細は同センターのウェブサイトを参照されたい。

#### 5) 名古屋大学CKKビル<sup>13)</sup>(2013年竣工)

このプロジェクトは筆者が空調システムのコミッショニングプロセスをCA(Commissioning Authority、性能検証責任者)として大学インハウスチームと協力して設計から運転フェーズまでの性能管理を行ったもの、たまた

ま前述までの諸活動の最終段階にあたり、コミッショニングの立場からは CA としてのプロトタイプを樹立し、蓄熱技術の観点からは、残された懸案事項である、ファンコイルユニットの大温度差還水の実現による蓄熱槽効率の極大化と、蓄熱システムの経済性、省エネルギー性の極致を追求したものである。

システム：中央熱源系(研究室系統)とビルマルチパッケージ系(実験室系統)があり、中央熱源系の熱源は井水熱源温度成層型複式蓄熱(熱回収)ヒートポンプ(実運転は非熱回収)、二次側は天井設置ファンコイルユニット、外気供給はアースチューブとエコシャフトを通して別系統で供給する。

ファンコイルユニットと大温度差確保二方弁と超大温度差蓄熱槽：二次側にファンコイルユニットのある過去のすべての蓄熱システムは実運転温度差が 1~3℃しか取れず、その系統の全システムの中に占める割合によるが、実際の蓄熱(往還水)温度差が良くても 5℃、悪くても 2℃程度、低流量型ユニットを用いた最高の例でも 10℃であった。低流量型ファンコイルの採用はもとより、この時期には一般化した小流量低価格(商用)二方弁を用い、ファンコントローラーと関連付けることによって低負荷時に定格以上の温度差が得られるという二方弁制御の特性を生かすことによって、図 24 に示すような大温度差蓄熱槽が実現した。定格温度差(10℃)基準で表現する蓄熱槽効率では 150%、有効温度差 17℃という高効率が得られた。従来の蓄熱槽に対して 1/3 の容量で済むことになる。

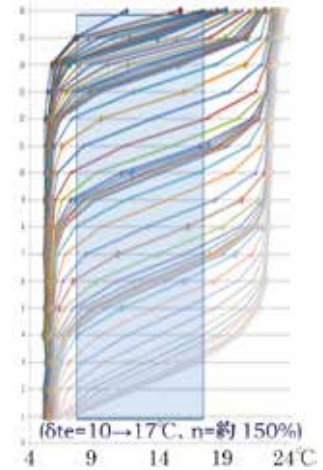


図 24 CKK の超大温度差温度成層型蓄熱槽

#### 6) ビルマルチパッケージ空調方式に代えて<sup>14)</sup>

蓄熱システムの省エネルギー化と高効率化を追求してきた結論が図 24 に集約されるが、その結果として、ビルマルチパッケージシステムに席卷されてきた空調設計業界に対して、蓄熱/ファンコイルユニットによる水・空気方式の復権を提起したい。ビルマルチの室内ユニットはファンコイルユニットに入れ替われば同様の個別制御性を有し、空冷熱(または水冷熱も可)屋外機が超大温度差蓄熱熱源に入れ替われば、この IoT の時代であればテナントへの空調料金の個別課金も容易に可能であろう。蓄熱槽が極小化することによって初期コストも節減され、CKK ビルモデルについて計算された図 25 のシミュレーション結果に見られるように、大幅な省エネルギー化によるエネルギー経済性はさらに大きい(但しこの計算結果は建物の内部負荷率は想定値よりかなり低かった条件が含まれている)。興味深くも標準化された技術的テーマの満載するこのシステムの魅力を満喫できると言えよう。

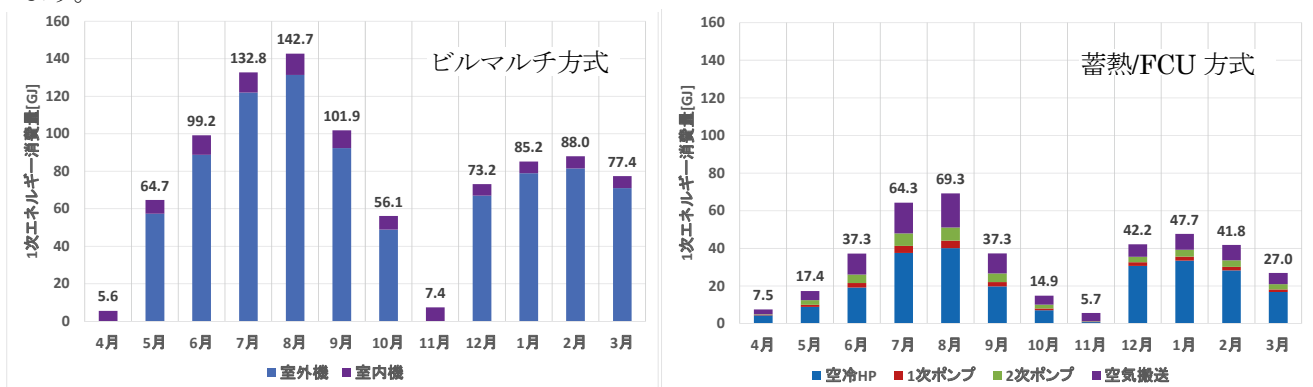


図 25 LOEM による CKK モデルのビルマルチ方式と蓄熱/FCU 方式とのエネルギー消費量比較

### 3. 将来を見据えた課題

筆者は 21 世紀を展望して空調技術或いは環境システム技術の将来課題を当学会誌上<sup>15,16)</sup>にて論じた。テーマは大別して四つに分類し、環境・エネルギーシステム課題 8 題、教育課題 3 題、ライフスタイル課題 6 題、国際交流課題 4 題を掲げた。課題のいくつかは解決されつつあり、解決に時間のかかるもの、停滞しているものもあるが、ここでは以下の三課題を取り上げて後輩の皆さんに託したい。

### 3.1 IoT/AI 展開への方向性

スマートフォンを自由自在に操作していない筆者がこのテーマを論じるのはいささか越権の感があるが、2.2 (2) 2) に述べた、業界に最初に本格的コンピューターコントロールと最適化制御を導入した者として一言述べる資格は有ろう。IoT によって計測の対象と数とが莫大なものになってくるのは必至であるから、システム性能の同定や不具合検知・診断は手法と精度を大幅に向上させることになる。問題は適切な評価指標(最適化制御の場合は評価関数)が設立されていること、因果関係を正しく整理することが必要である。

AI に関してはどうだろう。多量のデータを処理し共通の法則を捻り出して次に打つ手を決めるという得意の手法を持ち込むには、多種多様なシステムが考えられる空調では同種のデータをそれほど多量に獲得するのは困難であろう。例えば同種多量に存在するビルマルチパッケージシステムであれば有効に活用できると思われるが、筆者の主張する、対象物件ごとにその背景と目的に対して最適なシステムを構築するのが空調技術の魅力であるとすれば、この型の AI には適さない。すなわち、システム提案に当たってはすべからくそれぞれの技術者の経験をもとに新しい知見を発展させてもらいたいものである。しかし最適化制御のように、アルゴリズムと評価関数を明確にした場合はデータ収集と解析をデジタル技術に任せ、さらに学習結果を予測モデルの進化に反映できる構造にすれば、これまでと比較にならないほどの期待が持てる。前述の大阪大林ビルの OPC にてコア容量が僅かに 16k ワードのミニコンピューターで、プログラム作りに四苦八苦したのに比べればまさに月とスッポンだからである。逆に言うところの程度の極弱小なミニコンでも不完全ながらも処理し得たとことを考えると、IoT/AI 時代の適用対象の種類と処理量とは膨大なもので、その応用範囲は前途洋々たるものであろう。

### 3.2 高齢者環境技術

いま、自らが高齢者になったことで痛感するテーマではある。高齢社会の到来で、健康弱者である高齢者や身体不自由者に配慮した環境設計への強い社会的要請がある。環境に優しい建築(環境建築とも呼ばれる)は高齢者に優しい建築でもありたいところ。しかし自然エネルギーの有効活用を第一義とする環境建築にあっては、環境制御範囲の緩和が基本になる一方、高齢者の温冷感、働き盛りの若者に主点を置き、学生層の被験者実験に頼って確立された従来の基準値をそのまま適合させることはできない。他方で、寒暑感に鈍感であるといわれる高齢者をそのまま被験者とすればそれはそれで適切な結果を得るとも思えず、医学的な問題が生じよう。

高齢者は高温環境を検知し難いと言われるが生理的な許容温度幅はむしろ狭いはずである。ギャップが生じる一因は生理以外のところにも有って、高齢者にはエアコンの多機能リモコンの活用が困難であることも関係しよう。その結果、面倒だ、或いは混乱してしまって冷暖房運転を控えたり運転法を誤ってしまい、熱中症になったり風邪をひくなどの相次ぐ事故をいかにして防ぐか、高齢者向けの設計基準と機器の開発、判りやすい生活指針が必要とされるなど、多くの研究テーマが解決を求めている。

### 3.3 防災対応環境技術

地震・津波、豪雨・洪水が頻発し、忘れた頃に火山噴火が起き、さらには天体の地球への衝突まで話題に上ると言う風に、自然災害の話題に事欠かない昨今、対災害建築と避難環境の向上が重要性を増してくる。防災対応には、建築(設備)側としては、災害に耐え得る建築やシステム構築の問題と、避難所空間の衛生的健康的環境の保持とがある。

#### (1) 対災害建築・システムの構築

これは建築設備以前の課題が大きく、裏山の地崩れ防止、河川或いは海岸の堤防の嵩上げ等につけられないとすれば、新築ないし改築物件はすべからく一階が多用途のプロテクト構造でかつ耐震性のある高床式構造とせざるを得ないであろうが、トイレ等水回りは階上に設けるべきであろう。しかし高齢者居宅化する可能性は大であるから、上下の移動手段に工夫が要る。思いつき程度のことしか述べられないが、非常用エネルギーとしては矢張り太陽エネルギーに頼る電力供給、温冷熱供給システムの設置が好ましいのではないかと。

## (2) 避難所環境の整備

公民館や学校などのほか、時にはホテルや病院なども避難所として活用される、これらは本来は特定の用途のある大規模な施設になるから、もともと耐震性に富み、ユーティリティーの設備はそれ自身の用途に対して便利に整備されているはずであるが、特に大型のホール空間が臨時的な生活の場になった場合、視線と騒音を遮る最小限のプライバシーの確保、とくに仮設のトイレ・手洗い設備など、建築・設備専門家が本格的に取り組み、国や自治体の防災施策の一環として、臨時に迅速に対応可能な衛生環境整備体制を確立することが求められる。支援者も含めて、そのような場を体験された方々の意見をくみ上げ、自治体の政策と財政の制約の下にあって、どのようなランクでどのようなシステムであれば実用的たり得るのか、本格的な研究課題ではなからうか。

考えてみればこの場面は、図1の人間・環境。資源エネルギーの三角循環関係の最も原始的な状態に突如はめ込まれるわけであり、然も、滞在期間が豪雨による河川洪水の時のような日単位から、大震災事故による時のような数か月～数年に及ぶ場合がある。臨時とは言え定常化する災害に対して、学会としても設備屋としても本格的に取り組む必要があると痛感する次第である。

おわりに

筆者は、実に数冊の空調・建築設備の参考和書しか無かった時代に建築設備を専門としてゼネコンに職を得、60年間に亘りひきつけて大学等での研究教育開発に携わってきた中で体験し培ってきた建築設備・空調技術の魅力を、溢れ返る情報の恩恵と煩雑を浴びる現代の若手の技術者や教育者に、いかに伝えるのが最善かと迷いながら筆を進めたが、予定ページ数を大幅に超えながら、限定したトピックにしか触れることはできなかった。読者がその中から新しい職業意識を芽生えさせ、更なる若者たちへその魅力を伝承して行って下されば筆者としては冥利に尽きる。この機会を与えてくださった中部支部50周年記念事業委員会の執行部の皆さんに祝意と謝意を述べるとともに、次の50年に向けて会員一同、力強い歩みを続けて行かれんことを祈念して筆をおきます。

## 文献

- <sup>1</sup> 環境ステック中原研究処のホームページ([http://www7a.biglobe.ne.jp/~nob\\_naka](http://www7a.biglobe.ne.jp/~nob_naka))上に掲載
- <sup>2</sup> 中原信生:大空間の空気調和計画、空気調和・衛生工学、1977.11
- <sup>3</sup> 中原信生・後藤達雄・宮川保之:室内空気分布に関する模型実験と実測、空気調和・衛生工学、1971.10
- <sup>4</sup> 中原信生・島田謙児・湯澤秀樹:暖房予熱時の装置容量と予熱負荷係数の推定法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、1988.10
- <sup>5</sup> 中原信生・梶原豊久・伊藤尚寛:空気調和における室内混合損失の防止に関する研究、第1報～第3報、空気調和・衛生工学会論文集、1987.2,1989.10
- <sup>6</sup> 辻本誠・相良和伸・中原信生:蓄熱槽に関する研究、第1報—成層型蓄熱槽の槽内混合機構に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会論文集、1981.6
- <sup>7</sup> 伊藤久寛・横井睦巳・中原信生:温風暖房空間の上下温度分布の簡易計算モデル、空調空間の熱的特性に関する研究 第2報、日本建築学会計画系論文報告集、1989.4
- <sup>8</sup> 伊藤久寛・中原信生・宮井信雄:床吹出し空調システムに関する研究 第1報、日本建築学会計画系論文報告集、1993.10
- <sup>9</sup> 中原信生:大阪放送会館新館の空気調和設備とその運転実績、空気調和・衛生工学、1967.5
- <sup>10</sup> 中原信生:空調設備の最適化制御に関する実践的研究、第1報～第5報、空気調和・衛生工学会論文集、1981.10、1982.2
- <sup>11</sup> 中原信生・相良和伸:蓄熱槽の特性解析に関する研究 その16、空気調和・衛生工学会学術論文集、1985.9
- <sup>12</sup> 中原信生・射場本忠彦・南島正範:蓄熱システムのライフサイクル最適化の技術及び性能検証のマニュアル体系について、空気調和・衛生工学会大会論文集、2015
- <sup>13</sup> 中原信生・奥宮正哉・宮崎友昭・神村一幸・西谷義彦:蓄熱空調システムの最適制御の大学施設における実践研究、第1報～第5報、空気調和・衛生工学会大会論文集、2014～2015
- <sup>14</sup> 中原信生・奥宮正哉・西谷義彦・中塚一喜:省エネルギー型大温度差水蓄熱・FCU—水・空気式空調システムの性能、第1報～第5報、空気調和・衛生工学会大会論文集、2016～2017
- <sup>15</sup> 中原信生:建築設備から環境システムへの展開と課題、空気調和・衛生工学、1996.5
- <sup>16</sup> 中原信生:21世紀の環境・エネルギーとライフスタイルのあり方、空気調和・衛生工学、2001.1