

# 建築物の空調設備システムの性能検証

K. M. Elovitz, P. E.

ASHRAE会員

訳：玉置進、中原信生

## 要約

独立した、明白な一分野としての性能検証 (Commissioning) は、建設業界にとって比較的新しい分野であるが、発注者、設計者、および施工業者といったすべての建設関係当事者の間で関心が急速に高まってきている。本論文では、性能検証が必要になった背景と、性能検証が重要である理由について述べる。そして性能検証の準備のための手順、性能検証計画の立案方法、関連組織とその役割について示唆しつつ、性能検証の過程についての記述を進める。最後に、性能検証により何が明らかになるのか、どんなデータが得られるのか、得られたデータをどのように解析するのか、また、どのような修正がなされたかを示す手段として、若干の性能検証経験の実例を示す。

## はじめに

### 建築物の性能検証とは何か？

独立した、明白な一分野としての性能検証は、建設業界にとって比較的新しい分野である。辞書にある性能検証の定義の中で建設業界にもっとも適したものは、船舶を就航させるという意味の海事用語である。

建築物の空調設備システムの性能検証とは、システムの性能を評価する過程である。

- 性能検証は過程であり、ある瞬間またはある作動状態を静的に捉えたスナップショットにとどまらない。性能検証には、多数の作動条件のシミュレーションとシステムが各条件にตอบสนองする動的な解析を伴うものである。また、性能検証は、一つのシミュレーション状態からもう一つ別のシミュレーション状態への変化にシステムがどうตอบสนองするかを分析する作業も伴う。
- 性能検証は、統合化された全体システムに焦点を当てるものである。したがって、性能検証は、建設プロジェクトにおいて、異なる業種の作業間の慣習的な境界を超えるものとなる。適切な性能検証が行われていないシステムでは、個々のコンポーネントまたはサブシステムが、独立したものとしては十分に機能するが、一体化したシステムとして適切な

相互関係を保ち得ない、或いは機能しない。

- 性能検証過程の目的は性能評価である。作業者の質と施工の細部は、プロジェクトの成否にかかわる重要な要素であるが、性能検証との関わりは無い。性能検証は、システムが所期の機能を達成するかどうか、すなわち所期の能力を発揮するかどうかに関わっている。

建築物の性能検証の関心対象は、設計のそれとは極めて異なっており、これら进行处理するには異なった型の解析が必要になる。また、性能検証は、パンチリスト(未決項目リスト、punch list)とはまったく異なるもので、その代わりのものではない。パンチリストは施工の細部に亘るもので、システムが高品質の材料とすぐれた技術により施工されたかどうかに関心がある。性能検証は、システムが所期の性能を発揮できるかどうかに関心があるのである。パンチリストでは排水弁のプラグが抜けている、といった点に注目するが、性能検証では、排水弁が機器の正しい位置に取り付けられているか、弁を開けてみて排水が適正に行えるかどうかチェックするといったようなものである。パンチリストがダクトのシール材の種類と塗布方法を問題にするとき、性能検証では、ダクトからの漏れ量を測定したり、システムに不当な負荷をかけてみて制御と制御機器が望ましい動きをするかどうかに関心するだろう。

性能検証を算数に例えると、性能検証では小数点の左側にある数値に注目する。このため、機知に富んだ手段とほんの少しの道具を用いることで、十分徹底した性能検証を行うことができる。

### なぜ性能検証が必要なのか？

性能検証は不必要であると主張する人もいて、その主張の根拠としてプロジェクトの仕様書を挙げ、それがほとんどの場合、操作マニュアルの作成を求め、また、請負者が発注者側の保守要員に新しい機器の適切な運転保守法について指導するように規定していることを指摘する。

また、別の人の主張では、メーカーが各機器の細かい設置作業を行い、運転操作についての指導もするのだから訓練は不要であり、性能検証はなおさら不必要であるとする。彼等は(一理あるけれども)、メーカーの方が施工請負業者や設計エンジニア、そして性能検証専門コンサルタントよりも、機器の動作について良く知っていると信じている。彼らは、設計が適正であり、その設計図と仕様書に従って適正に施工されれば、すべてが正常に作動してそれ以上何の試験も必要はない、と主張する。設計エンジニアというものは

般に自分のシステムの設計は良くできていると考えるし、技術員はと言えば、設計とメーカーの説明書に厳密に従って設置した(ただし梱包材といっしょに説明書が処分されていなければの話だが)、とほぼ例外なく保証するものである。

以上のどの意見も、建設関係当事者の関心が異なっているから性能検証が必要なのだという事に触れていない。請負者が誰であり、彼がいかに良心的であろうとも、請負者の究極の目的は、最終的な支払が行われるように責任ある立場の者(通常、設計エンジニア)に署名させることである。結局のところ請負者はお金儲けの仕事をしているのである。請負者の意図がどんなによろしくとも、善意ではシステムの性能は保証できない。いったん大部分のものが設置されると、メーカーの説明書に従って設置しました、システムはまあまあ何とか動いています、ということで請負者の最終支払い要求ということで終わる、というシステムがいかに多いことか。請負者もまた人間だから、最低限のところでは済ませるとしたら、それ以上の事をしても多くの場合何の報いもないのである。ここに言う最低限というものがとても満足に作動するとは言えないものであったとしても、必ずしも責任はすべて請負者にあるわけではない。

一方、発注者は動くシステムがほしい、それも今欲しいのである。ふつう、特に総枠で請負という契約の場合には、システムが動くようにするために余分の金と労力を費やさなければならぬかどうかなど、構ったことではない。

このような利害の対立は、もちろん今に始まったことではない。したがって、1980年代半ばから性能検証への関心を高めてきた要因を内包する現在の建設行為には、何か異常なところがあるに違いない。

1990年代に設置される空調設備システムは1960年代や1970年代に設置されたものよりもはるかに複雑であろう。変風量(VAV)方式は、1960年代には目新しいシステムであったが、1980年代にはほぼ標準的なものになった。VAV方式に伴って、建物負荷変動に合わせてファンの風量調整を行い、全風量の如何にかかわらず必要な換気を保つために還気ファンと外気取り入れダンパーを制御する、というように複雑になった。1970年代の石油輸出禁止以後、数多くのシステムにとって、熱回収が経済的に魅力ある方式となった。専用のポンプ・配管・制御装置を有する熱回収コイルは別のシステムを構成しており、25年前なら単純な定風量、全外気方式であったと思われるシステムの設計・運転・制御に、このシステムを組み込む必要がある。

1980年代には、蓄熱に改めて関心が集まったが、この関心が1990年代に高まりをみせるに違いない。冷凍機蒸発器表面の氷結防止運転・制御の良い方法がわかったちょうど今、われわれは、従来のHVACシステムと氷とを一体化させる様々な方法について考えなければならない状況にある。システムのコンセプトが複雑かつ先駆的なものになればなるほど、現在「性能検証」と呼ばれているタイプの試験と解析の必要性が高まるのである。

この複雑性は技術的な性格を持つものであり、何れは優れた設計エンジニア達はその克服方法を見出すであろう。技術的な複雑性が回避され、或いは克服されたとしても、設計エンジニアがコントロールできない、現今の建設産業の非技術的側面が性能検証を必要とするのである。どのプロジェクトでも、時間と経費は大きな圧迫となっており、これに高金利と高賃金が拍車をかけている。これらの要因は、建設業界の競争激化の一因となっており、その結果、設計エンジニアおよび請負者には、余分の労力を費やす時間も経費もなくしている。時間と経費が不足すると、システム性能を妨げるようなディテールを見逃すようになる。性能検証によってこのような欠陥を明らかにし、補正することができる。

機器のメーカーは、市場シェアの拡大と競争に対応する努力の一環として、自社の機器を設置するにはほんの簡単な接続だけで済むという点を強調して、設計エンジニアや請負者の歓心を引こうと努めている。その結果、設計エンジニアは、複数の要素機器を選ばざるを得ず、これらを一かにか一つの有用なシステムとして組み合わせるか、を考え出さねばならない場合に比べて、十分な設計をしないことがある。単純な接続箇所しかないような機器は、基本的な用途には理想的であろうが、より複雑な用途や特殊な用途では、基本的な用途の場合よりも多岐にわたる考慮が必要になる。性能検証過程によってシステムの幾つかの欠陥を浮き彫りし、改善する方法を指摘することができる。

仮に、当初から作業が入念に監視・管理されており、前述のような落とし穴がすべて回避されて性能検証が不必要であったとしても、それでもなお、性能検証は有意義である。メーカーが行う加速ライフサイクルテストの場合とまったく同様に、性能検証も、システムが各種環境のもとで作動する様子を短期間で見る機会を与える。このようにして性能検証は、システムがどのように作動するか、実際にどのように作動しているか、何が限界であるかを、システム運転責任者が知る助けになるのである。また、性能検証によって一定の基準性能の記録をとることができる。この記録された基準性能は、発注者が投資した設備の能力を明らかにするばかりか、これを参照して将来どの時期に保全作業が必要となるか、保全作業の結果初期性能を回復したか否か、を手軽に判定することができるのである。

## 性能検証過程と手順

### 性能検証の準備

性能検証が成功するには、まず、機能的な建物やシステムの受渡しを公約することが出発点になる。

- ・ 発注者による上記の目標に対する責務は、建築家や設計エンジニアが作業を開始できるように、設計の基礎的事項を纏めて伝える努力をすることに始まる。各部屋の居住人数は何人か？室内で行われる活動は何か？どんな特殊な機器が設置される

か？そして、空調、電気、給排水等への特別の要望は？

- ・ 建築家および設計エンジニアによる上記の目標に対する責務は、理解した限りの設計規準を文書化し、提案する設計意図がどのようにその設計規準を満たすのかを施主に説明することからスタートする。これに続いて、設計意図を明確にする図面と仕様書を作成し、請負者が契約文書から施工体系を作ることができるようにする。建築家や設計エンジニアは、互いに他分野の要求事項を考慮することが、設計を成功に導く一法であることを認識する必要がある。自分の側のシステム設計に変更を加えると他のシステムに影響を与え、従ってお互いの要求に合わせるためにさらに変更するよう対応を迫られるということを知っておく必要がある。
- ・ 請負者による上記の目標に対する責務は、そのシステムが作動し相互に作用しあって、設計意図を実現し、かつ設計規準を満たすようなシステムの設置を決意することが出発点となる。

### 性能検証計画の立案

他の作業と同様に性能検証においても、それを成功させるためには目的を規定し、性能評価のベンチマーク(基準)を設定した体系的な方法や戦略が必要である。性能検証作業の場合、その戦略は、当面のプロジェクトに合わせて特に仕立てた、文書化されたテストプロトコル(試験規定書)の形式をとる必要がある。この規定書は、気象や時期、機器の適用性能、建物の居住状況などによる制約を配慮せねばならない。規定書は、読み取った指示値や測定値を記載したデータシートを含み、試験結果を順序良く記録するのに便利な手段となる必要がある。もし結果が文書化も報告もされないならば、性能検証は無用の長物同然になってしまう。

役に立つ試験規定書を作成する第1歩は、システムが様々な環境のもとで果たすことになっている機能を完全に理解することである。規定された運転シーケンスを復習することが適切な出発点になる。そうすると、気象条件やシステムの特徴に応じて、多様な条件のシミュレーションを行う手段を考案することが可能となる。

役に立つ性能検証計画を作成するには、システムの物理的特徴およびその能力を理解することも必要である。これを把握すれば、性能検証を有効にするだけでなく、時間が節約でき、ビル利用における混乱を減らすことができる。例えば、VAVシステムの静圧制御装置の試験を行う方法の1つとして、建物の中を順番に回って、すべてのサーモスタットの設定を最低にする方法がある。そうするとサーモスタットの働きによりVAVボックスのダンパが開いてシステムの圧力が減少し、この変化によりファンの能力を増大させなければならなくなる。このような方法は時間がかかり、建物の居住者の邪魔をし、そして試験が終わる前に居住者がサーモスタットの設定を変更してしまっ、性能検証チ

ームが振り回され気味になることもありえる。場合によっては、システムの圧力を実際に変更しなくても信号を調整できるようにシステムの静圧を感知するラインにブリード弁を一時的に取り付けることにより、前記の方法と同等(あるいはそれ以上)のデータを収集できる場合もあろう。

システムの作動状態を全体として評価するとともに、サブシステム同士が相互にいかにか作用し合うかきを調べるのが性能検証の一つの目的になっているため、試験規定書は、サブシステム相互の作用がモニタできるように作成する必要がある。例えば、給気および還気ファンの追跡機能を備えたVAVシステムを考えることにする。システムの静圧制御の試験を行うと、システムへの給気量が変化するはずである。還気ファンの追跡制御が関連サブシステム内の外乱にどのように応答するかをチェックするのに良いタイミングとはいっだろうか。

当然ながら、試験規定書では、シミュレーションの対象条件およびシミュレーションの実施方法を明らかにする必要があるが、システムが各条件にどのように応答するかについても示す必要がある。そうでなければ、性能検証チームにはシステムがいつ正常に反応するか判らず、また、システムの性能の欠陥と、試験方法から来る欠陥とを区別することができなくなる。例えば、気温の高い日には、外気ダンパを強制的に開くことによって、冷却コイルにかかる負荷を増大させることができる。然しながら、ダンパの開いた理由がリンケージが外れたからか、空気式アクチュエータにメインの空気圧を直接に加えたからか、或いはエコノマイザ(外気冷房)の切り替え制御設定点を変更したからかによってシステムの応答は異なるであろう。

実際に作動しているシステム内で発生する様態でその事象を模擬する方法を探すが、試験規定書を作成する一般的な指針の1つとなる。ボイラの低水位遮断について言えば、寿命期間中ボイラのそばにつきっきりでいて、水位が下がったときには短絡させよう、というのでない限り、接点を短絡させて試験してはならない。性能検証でチェックしようとしている状況を作り出すには、給水ポンプの弁を閉じるか、または排出弁を開くことである。

### 誰が空調システムの性能検証をするのか？

システムの性能検証を適切に行うには、性能検証チームのリーダーがシステムがいかにか作動するのかを理解しているいなくてはならない。設計というものが建設プログラムの機能要件を満たすことを基本としていられるので、通常は設計者が建物の性能検証を行う能力が十分あるはずである。しかし、性能検証チームを効果的に率いていけるのは設計者だけに限らない。もし設計者以外の誰かがビルの性能検証者に選ばれるならば、相当の時間を費やしてシステム設計の詳細を分析し、パズルを解くように、システムの個々の構成要素および構成要素同士の関連を十分理解するように計画しなければならない。

大型のシステムや複雑なシステムの性能検証には数日かかるが、試験は、連日の作業で性能検証を完了し

なくともすむように計画することが可能である。性能検証の開始前に、提案する試験規定書を関係当事者すべてに配布して事前検討と準備をさせるのが良い。

- ・ 請負者は、システムに対する期待性能を知る立場にあるので、自ら予備試験を行い、正規の性能検証を実施した場合にシステムが承認されるだろうと自己満足することができる。性能検証の行われるのが、システムの引渡し前か後かによって異なるが、チームリーダーの指示のもとに、機器の起動・停止や設定点を変更するなどの、実際の性能検証試験を実施するのに最も適切な者であろう。これと同時に請負者は、最終的な調整と、性能検証中に見つかった軽微な欠陥を是正する機会も得られる。
- ・ 試験調整業者は、システムの性能検証を行うに必要な多くの計測を行う計器を持っている。システムの調整以前に性能検証を行ってもまったく無意味である。調整作業の過程で、技能者は各機器について熟知することになったであろうから、その知識は、性能検証チームにとって非常に役に立つ。
- ・ 発注者は実施中の試験について理解を深めるべきであり、理想的には、それに立会って性能検証過程の目的を理解すべきで、それにより性能検証をすれば何とか将来の機械的故障を防ぎ消費を無くせるといった誤信をしないようになるであろう。システムのある環境のもとでの応答、正常な運転音、安全装置の作動、そしてシステムの限界を実際に見聞きすれば、発注者にとって得るところが大きい。
- ・ 設計者は試験規定書をチェックして、提案された試験項目が、設計で決して意図しなかったような機能をシステムが満たすことを求めているかどうかを校閲すべきである。

もし、性能検証の結果により影響を受ける可能性がある者は誰でも、性能検証過程の構成の決定に参加する機会があるならば、性能検証の結果として出される勧告をより容易に受け入れられるであろう。

## 性能検証と設計/施工（デザイン/ビルド）

設計/施工（デザイン/ビルド）プロジェクトでは、設計者は発注者ではなく請負者に雇用される。システムを設置する知識、技術には、特定の請負者が最も長けているのだから、この方式のほうが伝統的な計画＋仕様方式（訳注：設計・施工分離方式）よりも経済性が高い、というのが設計施工請負会社の主張である。設計施工方式の場合に発注者の受渡し試験としての性能検証が特に有用であろう。

設計/施工の考えを適切に適用するには、伝統的な計画＋仕様方式におけるとまったく同じように詳しい、

プロジェクトの設計図と設備の文書化を行う。多くの発注者と建築家は、あまり芳しくない体験からこの設計施工のやり方に懸念を抱いている。かかる不幸な体験は、大抵、適切な設計基準の設定、伝達ができなかったことが大きな理由である。ほかに、施工過程に基本的な欠陥があったケースもあった。例えば、設計施工の設計部分を、作業の進行と並行して現場で実施するように業者にまかせっきりにするなどである。

性能検証の設計施工プロジェクトとの関係は、伝統的な計画＋仕様方式との関係と実際には変わらない。設計施工を成功に導く鍵は、各業者が施工行為を開始する前に完全に設計を終えることを要求することである。最善の性能検証でさえも、例えば設計基準が不明確或いは欠如しているような、基本的な欠陥を償い、克服することはできない。

## 性能検証の実例

以下に示す実際の性能検証例により、性能検証による調査と解析の形式を説明する。取り上げた例の一部は、トラブル処理の場合であり、ほかのものは実際にトラブルが現われる前に行った処理の類である。

### 水－水熱交換器

汚れがつきやすい典型的な熱交換器に、ボイラからの温水によって加熱するサイドアーム型（訳注：ボイラー外付け）かタンクレス型（訳注：ボイラー内挿入）の温水ヒーターがある。もし熱交換器のいずれか一方の側が汚れると性能が低下する。給湯温度とボイラ温水温度との差が通常よりも高くなると、汚れが生じた証拠である。ボイラ燃焼停止中のボイラー内温度低下が緩やかなときも、熱交換面が汚れた兆候である。ボイラー温水からの取り出し熱量が少なければその温度効果は緩やかとなるからである。

熱交換面に汚れがなく、熱伝達率が適切であることだけが、熱交換器の負荷側の（市水が給湯器に入って出て行く）給湯温度に影響を与える唯一の要因ではない。熱交換量（給湯水に加えられた熱量）は設計値に達しているのに、給湯温度が低すぎて使いものにならないこともある。あるアパートの居住者から、給湯が不十分であるとの苦情がでたことがあり、温度測定および給湯の流量測定を伴う性能検証を行った結果、タンクレスヒーターを流れる流量が多すぎるために問題が発生したことを突き止めた。

タンクレスヒーターを通過する流量が多すぎる場合、熱伝達は適切ではあるが給湯温度が低すぎて役に立たなくなる。伝熱量が同じ場合、水量が50%（訳注：100%すなわち2倍でなければならない）増加すると温度上昇が50%減少する。「給湯不足」の問題は、流量制限装

置を取り付け、熱交換器を通過する流量を定格値に抑制することによって解決した。流量を低下させることによって、ヒーターにより水を適切な利用温度まで暖めることができたのである。

### 室内サーモスタット

室内サーモスタットは、比較的単純な装置であるが、温度制御に関する苦情の原因になることがあり、したがって、性能検証の対象にする必要がある。較正が重要なのは勿論のことで、較正に狂いがあると、サーモスタットは実際の室温よりも数度高い、或いは低い温度を検出し、その結果、室温が希望の温度よりも数度低く、或いは高くなる。

サーモスタットの取付位置は動作確認と同じく重要である。サーモスタットの取付位置に起因する問題は、システムの性能検証を行うまで明るみにでない場合がある。サーモスタットの取付位置が問題の原因になった事例に、室温が一貫して低い、あるホテルの会議室の場合がある。コンピュータ制御システムを入念に点検し、ほかの制御装置と同様、動作が適正であることを確認した。センサの隣に信頼のおける温度計を置き、温度計の読みと自動制御システムの読出し値とを比較してセンサの較正を確認した。現地において暖房および冷房要求を最大にしたときのシステムの応答を確認する一連の試験を行った結果、問題の原因を特定した。サーモスタットが照明システムの調光装置の直上に取り付けてあったのである。調光装置からの発熱でサーモスタットは室温を実際より高いと誤判断したのである。サーモスタットを移設して問題は解決した。

サーモスタットの読みに影響を与える局所的熱源がなくてもサーモスタットの取付配置が問題になる場合がある。水熱源ヒートポンプを使用しているある保健所で、殆ど毎日のように午前中ごろになると冷房が不適切になるとの苦情があった。ヒートポンプの安全回路が働いて停止しているのを技術員が見つけてはリセットして再起動していた。しばらくの間、何故こんなに停止するのか不明のままであったが、現地を調べてみると、水銀スイッチ内臓のサーモスタットがドアの錠のついている側に隣接して取り付けられているものが多いことがわかった。サーモスタットの設定値がほぼ満たされつつある頃に誰かがドアを乱暴に閉めすぎると水銀スイッチが瞬間的に傾いて一時的にユニットを停止させ、そしてすぐにもとに戻る。停止後再起動までの時間が短すぎるために圧縮機が過大な吐出圧力で作動するために安全装置が働いたのである。サーモスタットを移動すると、問題は解決した。

サーモスタットの取付位置自体は問題ではないが、取付位置が問題の特定および解決の糸口となることが時々ある。ある試験機器を多数配置した部屋の居住者から、冷房が不十分だと苦情が来た。あれだけの発熱機器がある状態では、システムをオン状態にしておくだけの冷房負荷が当然あったはずだが、室内は常に蒸し暑かった。現場では、コンピューター制御システムによる室温指示値が温度計で測定した平均温度より

も数度低くなっていた。さらに調査してみた結果、天井吹出し口の吹出し方向板（パターン・ディフレクタ）の設定が不適切であることが判明した。サーモスタットが付いた壁に近いほうの一つの吹出し口が4方向吹出しに設定されており、給気量の約1/4が壁に向かって吹出されていた。吹出し空気には十分な風速があったので天井から壁に曲がって降下してサーモスタットに達し、平均室温ではない、給気と室内空気との混合空気の温度をサーモスタットが検出したのであった。吹出し方向板を調整して、当該領域の形状に合った気流パターンにしたところ、問題は解決した。

### ポンプおよびファン

ポンプおよびファンの性能検証を行うにあたって銘記しておくべきルールが3つある。

1. ポンプまたはファンの性能曲線は、ポンプまたはファンが所与の速度およびインペラ・サイズで吐き出す流量（gpmまたはcfm）と圧力との組み合わせをすべて網羅している。
2. システムの性能曲線は、システムによる圧力降下をあらゆる流量について網羅している。
3. ポンプまたはファンは、システムの性能曲線とポンプの性能曲線とが交わる点で作動する。

最近、あるエアハンドリングユニットを改造した。作業は、蒸気加熱コイルの交換、腐食した凝縮水パンの補修、ファンのシャフトとベアリングの交換などであった。システムの再稼働時に、ファンの静圧測定、ファンモーターの電流測定などを含めて性能検証を行った。両方とも設計速度についてファン性能曲線から予想された値よりもはるかに低かった。プーリの直径の比を調べて、正常な速度を確認し、シャフトは正しい方向に回転していた。そうすると静圧測定値が代表値でないか、あるいは、前記1のルールを侵しているかの何れかしかない。

遠心ファンでは、流速、静圧、馬力の3つが同時に低くなっていると、ファンが逆回転していることを示す。シャフトは数回点検しており、モータは正しい方向に回転していたが、誰もファンそのものを目で確認してはいなかった。エアハンドリングユニット内部に入り込んでみると、シャフトが確かに正しい方向に回転していたが、なんとファンの羽根車が後ろ向きにシャフトに取り付けられていた。

同様の事例として、あるコンドミニアムのファンコイルユニット内のファンが、正しい方向に回転していることを確認されていたにもかかわらず、設計空気量にはほど遠い送風量であった。遠心ファンの風量は空気抵抗に依存するので、風量の測定値が低いというだけでは、問題の診断を行うには不十分である。ダクト網が歪んでいると、その他の問題と同様に空気の流量が低下する。ところが、静圧測定を行ったところ、ファンの全圧もまた低いことがわかった。ファンは、性能曲線よりもはるかに下の状態で作動していたため、ファンを取り外して検査するために技術員が呼ばれた。ファンをキャビネットから出さないうちに、問題の原

因はファンの渦巻き底にあった大きな石膏の塊りで、これが空気の流れをファン内部で妨害していたことが判明した。このユニットは、早いうちから現場に配送されたもので、カバーもかけないまま屋内に保管されていた。解体作業で石膏がファンの開口部内に落下して底部に滑りこみ、システムが運転されるまで気付かれずに底部に残っていたのである。

時に、吐出し部直後にダクトの遷移部（漸縮または漸大）を取り付けた状態でファンを設置することがある。この遷移部はダクト内の流速を変化させる。短い、滑らかな遷移部においては測定可能な摩擦損失がないものと仮定すると、この継手による測定可能な全圧（エネルギー）変化が生じることはない。したがって、漸縮遷移部については、動圧が増大し静圧は低下する。遷移部以降でファンの吹出静圧を測定すると、ファンの吐出し静圧がメーカーの定格よりも低いように見える。メーカーの定格と比較できる全静圧のデータを収集するには、ファンの吐出し静圧を継手による断面変化する前の点で測定するか、または遷移部下流の速度により修正するまでである。

気流制御学会（Air Movement and Control Association: AMCA）では、ある種の適用において、ファンが性能曲線よりもかなり低い性能しか発揮しないように見える理由を説明するために、システム効果係数（System Effect Factor）という概念を創出した。システム効果係数は、継手（通常はエルボ）をファンの吸込み部または吐出し部に近接配置しすぎたことにより生じる圧力損失である。

システム効果係数は、ファン近くに配置した継手に起因する、ファン性能の低下量として説明される場合がある。ファンの取り付け方法がその性能、すなわち「ファンの性能曲線は、ファンが一定の速度で供給できる流量と圧力との組み合わせを残らず網羅している」ということに影響を与えるはずはないから、この概念は意味がない。ファンの性能曲線の形は、ファンの設計因子（羽根車の大きさ、羽根の数と形状、ケーシングの形状など）の関数であって、エルボがファンの吐出し部や吸込み部にあるかどうかによって、前記のどの設計因子も変化しない。

システム効果係数とは、ファン吸込み部、吐出し部に生じる不均一な気流パターンによる継手の圧力損失補正項であると理解するとより有用な概念となる。公表されている継手の圧力降下のデータは、継手への流入速度が一様であるものとしている。多くの専門家が、エルボを互いに近接させて配置する場合には圧力降下の計算値を補正するようにと推奨するのとまったく同様に、ファンの吸込み部または吐出し部にエルボを配置する場合は調整を行うことが妥当である。システム効果係数はAMCAの推奨する調整値である。システム効果係数というものを、システムの全静圧降下の計

の近くにある継手による圧力降下の計算値に加えるべき圧力降下であると考えることにより、システム効果係数が理解しやすくなる。

## 加熱コイル

性能検証作業は、必ずしもすべてが現場でなし得るものではない。その例に、あるエアハンドリングユニットがゆとりのある予熱コイルを備えているのに、凍結防止センサー（フリーズスタット）がトリップし続けたことがある。殆どの場合がそうであるように、この問題は20° F (-6.7°C) 台半ばの外気温のときに発生し、非常に気温が低い場合には発生しなかった。性能検証の一環としてコイルの容量解析を行ったところ、予熱コイルの大きさに余裕がある点に問題があることがわかった。予熱コイルの容量は随分大きくて、必要な予熱を行うには、設計温度180° F (82.2°C) の温水が少量必要になるだけであった。コイルは1列しかなかったため、温水がコイルの奥まで入り込む前に、全熱量が交換してしまい、多量の空気は未加熱のまま通過した。予熱コイルから出る空気の平均温度は、恐らく所定の設定点に近かったが、一部の空気は設定点よりもはるかに高温で、一部の空気はフリーズスタットがトリップするほど低かった。この問題の解決策は、混合弁を取り付け、低めの温度の温水を大量に流して、均一な予熱を行うことであった。

加熱コイルの制御が不適切だと、性能検証の一環として是正される問題が生じる場合がある。このような問題の一例に、やはり寒冷期におけるフリーズスタットのトリップを含んでいた。外気ダンパを動作させる混合空気温度制御装置を55° F (12.8°C) に設定してあったが、混合空気温度は30° F (-1.1°C) しかなかった。外気温度が17° F (-8.3°C) の場合、ダンパは約30%開くはずであったが、実際には70%開いた。これで、混合空気の温度が低く、フリーズスタットが時折トリップすることの説明はついたが、外部ダンパがなぜそれほど開いたのかは説明がつかなかった。問題は予熱コイル制御装置の設定点が59° F (15°C) で、吹出空気制御装置の設定点よりも数度高くなっていることであった。吹出空気制御装置により、外気ダンパをどんどん大きく開くようになり、そして余熱コイルで加えられた数度分の温度に対応する余剰熱量を打ち消すために冷たい外気がますます多く取り込まれた。その結果、外部空気の量が予熱コイルの容量を上回り、フリーズスタットがトリップしたのである。この問題は、吹出空気温度よりも数度低い所期の温度に予熱コイル制御温度をリセットすることにより解決した。その上に混合空気下限温度制御を加えて、仮に矛盾した制御設定が再現した場合でもダンパーが開き過ぎないように予防措置をとった。

## 計量

蒸気、冷水、あるいは温水など、各種媒体の使用率と総消費量をモニタする目的で計量システムを取り付

算値に加えるべき全般的な調整値ではなくて、ファン

ける場合が増加している。計量システムは、独立した装置である場合と、ビルオートメーションシステム(BAS)に接続される場合とがある。旧型メータの多くは機械式で流量と総使用量を測定できる。新型のメータは、特に計量システムで熱量計算を行う必要がある場合は電子式になってきている。

電子計量システムは、測定対象媒体を連続的に検出し、検出特性を電子信号に変換し、その信号の調整を行い、瞬間消費量を表示し、積算して全使用量を求める。これらの各段階が誤差を与える機会であり、性能検証過程がチェックすべきところである。

ある蒸気流量計が、熱供給会社のメーターが12000ポンド/h(5443kg/h)であるのに、8000ポンド/h(3629kg/h)しか指示しないという問題を調べるのに逐次解析を行った。圧力入力をバルブで締め切って流量ゼロを模擬した単純な点検で、不正なメータの出力指示値がゼロにならなかった。幾つかある調整や較正のどれかで誤差が持ち込まれた可能性があったが、結局、誤差の原因は、トランスデューサへの供給電源の電圧が高すぎることであったことがわかった。「他の全てがうまく働かない場合、説明書を読むこと」の、もう一つ別のケースであった。

流量計がない場合のクロスチェックには、チラーや冷却コイルのような、抵抗が判っている機器の圧力損失から水量を類推することができる。冷えない、という苦情のあった、あるエアハンドリングユニットにこの手法を応用した。冷却コイルに出入り口の圧力は何れも殆ど同じ、すなわち流量はゼロであった。恐らくコイルまたは配管内の障害物が原因であったであろう。

設計流量と機器メーカーの圧力損失データに二乗則を用いることにより、圧力降下の測定値から流量に変換することができる。当然ながら、測定した抵抗および既知の抵抗は、現在の状態のチラーや冷却コイルに関するものでなければならない。チューブが閉塞している場合はもはやメーカーの定格データは適用できない。

既知の抵抗を通過する際の圧力降下を測定して流量を推定する場合は注意が肝要である。圧力降下が小さい場合は測定値の許容誤差は、圧力差の指示値そのものに近づく。例えば、チラーまたは冷却コイル出入り口の圧力降下が8フィート(2.44m)(3.5psi(0.246kgf/cm<sup>2</sup>))と小さく、そして使用する圧力計によっては、許容誤差が1psi(0.07kgf/cm<sup>2</sup>)となる場合がある。この許容誤差は、測定した圧力差の25%以上である。圧力計の許容誤差の影響を最低限に抑えるには、通常、両方の指示値について同じゲージを使用するのが賢明である。圧力計の取り付け高さが異なる場合は、測定圧力差は取り付け位置間の静水頭によって補正して、既知の抵抗を通過する流動にのみ起因する圧力降下を決定せねばならない。

## センサの較正

建物の性能検証の重要な作業の一つに、センサの較正の確認がある。センサは、システムの目や耳であり、

したがって、信頼のおけるセンサがシステムの適正な運転にとって不可欠である。ところが、温度制御システム内で、較正值から数度外れたセンサを見かけることが珍しくない。

センサの較正は工場で実施しており、現場での較正については備えないというメーカーが多い。仮にセンサが工場で正しく較正されているにしても、出荷や取り付けの途中でゆすられたり、乱暴な扱いを受けたりしても、センサの較正が狂わないという保証はない。

工場における較正に関してもう1つ考えられる問題点は、通常、工場では、センサの適用対象である広い検出範囲の中央近くで較正を行うことである。最近のセンサは、広い検出範囲にわたってほぼ線形になっているが、ほとんどどのセンサにもわずかながら非線形性がある。正確な検出と制御が重要である場合、センサを、制御動作範囲の中央近くで再較正する必要がある。例えば、検出範囲が-40°F(-40°C)から200°F(93°C)である同一のセンサが、用途の違う冷水制御と温水制御に使用されることがあろう。冷水センサは50°F(15°C)付近で、温水センサは150°F(65.6°C)付近で較正する必要がある。もし工場での較正がセンサを検出範囲の中央(80°F(26.7°C))であったとすると、まったく重要でないような指示値で精度が最も良いということになる。センサの予想される動作範囲でセンサを較正することにより、最も重要な目盛り範囲に大きな誤差が入り込まなくなる。

温度センサの較正を確認するのもっとも適しているのは、液体封入ガラス温度計である。パイメタルを使った装置や熱電対よりも応答ははるかに遅いが、液体封入ガラス温度計は、較正の狂いが無い。0.2°F(0.1°C)刻みの目盛りの付いた実験用温度計というものがあるので、正確な温度測定が必要な場合に使用するとよい。

相対湿度(RH)は温度よりも測定が難しく、したがって、相対湿度センサは、温度センサよりも較正、保守が難しい。湿度センサの検定を行うのに最適なものは、乾湿計であり、これを使用すると、乾球温度計と湿球温度計が周囲の環境と平衡状態に達する十分な時間が得られる。

傾斜マノメータ(液柱圧力計)は、気流測定やファン追跡システム(fan-tracking system)で利用する低圧や圧力差を測定するのに便利である。マノメータのレベルとゼロ点調整を適切に行い、正しい液体が充填してあれば、較正の必要がないマノメータの指示値は正確である。

## ビル管理システム(ビルオートメーションシステム)

ビル管理システムが、あらゆる規模、種類の建物にますます普及してきている。現在利用できる、あまり複雑でないシステムを、新しいビルに設ける場合には従来の空気式制御装置に比べてコストが低い場合もあり、システム性能を監視するにも余分な経費をかけずに行うことができる。

ビル管理システムを使用すると、性能検証は容易に

なると同時に困難にもなる。ビル管理システムから非常に多くの情報を極めて簡単に得られるため、性能検証が楽になる。このように情報量が増加すると、そうでない場合に比べて性能検証作業をより徹底的に進めることができる。殆どのビル管理システムの有するデータロギング機能によって、性能検証チームは、長期にわたるシステム性能を監視して資料にまとめることができる。その反面、ビル管理システム自体が性能検証を必要とするシステムであるので、性能検証がより一層困難になるともいえる。ビル管理システムによって得られるデータが精度良く信頼性に富んでいなければ何の役にも立たない。

ビル管理システムの性能検証が可能であるためには、目的とする機能が項目ごとに明確に記述されねばならない。そうでなければ、性能検証チームには、BASが適切に機能しているか否かを判断する基準がないことになる。

ビル管理システムの精度と信頼性を実証する過程の中で、各BASプログラムのそれぞれのステップをレビューして、ロジックが所望の作動シーケンスを実行していることを確認すべきである。BASの、或いはBASを利用してその管理制御対象であるシステムの性能検証をする過程の中で、これらのプログラムへのアクセスが不可欠であるからである。

ビル管理システムの中には、ディスプレイ端末のないものヘッドエンド(head end: 訳注 いわゆるヒューマンインターフェイス)を使用せずに設置できるものがある。このようなシステムはコストの節約ができるが僅かであり、システムへの指示やシステムからのデータ採取の手段は唯一、現地で使用するキーパッドである。実行できる機能および得られる情報は極めて限定される。昨今は大から小まで、ビル管理システムの中継所はパーソナルコンピューターになる傾向にある。パソコンは融通が利くし価格も安いため、この部分を省いてコストを削減しようというのは賢明ではない。ビル管理システムにはモデムを取り付けて、性能検証あるいは建物・HVACシステムの運用に関わる責任者が、遠隔からBASと通信できるようにすべきである。

ビル管理システムをできるだけ重宝で価値あるものにするには、一点注意が必要である。すなわち、BAは建物を運用するツールであって、それ自体が目的ではない。容易に陥りがちなパターンは、ビル運用の戦略が、本来の空調の運転保守ではなく見栄えのよいトレンドログの作成となってしまうことである。ビル管理システムは貴重な情報を大量に提供することができるが、それは決して実際に運転しているシステムを監視することによって代わることはできない。さらに、どんなに素晴らしいビル管理システムであっても、それが生み出す情報に注意を払う必要がなくなるわけではない。

## 性能検証はシステムアプローチである

ある種のサブシステムの性能検証には、ありきたり

の据付・試運転過程には無い性能測定のための試験を含む。ほかのサブシステムの性能検証には、調整請負者が報告してきた性能を確認ないし解析し、また欠陥を修正するための補足的な試験・測定を含むであろう。然しながら、性能検証を他の施工過程と区別する局面は、性能検証はシステムアプローチである、という点にある。サブシステム個々の機能は良好であろうとも、システム全体の性能検証が完了するまでは、構成要素すべてが相互に適切に適合し合っているという証はない。

冷水システムの場合、性能検証過程では、負荷を増減してその1ないし数点においてチラーおよびポンプシステムの制御がどのように応答したかを文書化する作業を含むべきである。大型のエアハンドリングユニットのストップ弁を閉じたときにチラーがアンロードし、冷水の圧力差バイパス弁が開くはずである。チラーが複数ユニットある場合、残存負荷が先発のユニットの容量範囲内にあれば、後発ユニットとそのポンプとは停止していなければならない。蒸発器や凝縮器の水量を減らしてみたととき、チラーの保護装置から所望の応答が得られなければならない。実際の流量低減時に適切な応答が得られることを少しでも保証するには、動力盤内のインタロック端子を働かせるのではなく、バルブの開閉によって試験を実施すべきである。端子を働かせれば電気回路の点検はできるが、システム全体の点検はできない。

エアハンドリングユニットはそれ自体一つのサブシステムであるが、またそれ自体複数のサブシステムで構成される。エアハンドリングユニットの性能検証では、前記の複数のサブシステムが適正な連携動作を行うかをチェックするが、同時に、エアハンドリングユニットのために作用する諸システム(冷水、温水、熱回収システムなど)が、エアハンドリングユニットによってもたらされる中央プラントの負荷変動に対応する能力についてもチェックすべきである。

いかなる文書を探しても、あらゆる種類のシステムの性能検証方法や、予想される事態を残らず網羅したものはない。本論文の目的は、建物の性能検証の基礎となっている概念および技術的根拠の一部を提示することである。願わくばこの基礎知識が、創造性とあいまって有用な手引きとなることを望むものである。

## 性能検証に関する情報源

少なくとも、カンサスシティで1984年に開かれたASHRAE年次総会における建物の性能検証に関するフォーラムが開催されて以来、ビルの空調設備の性能検証がASHRAEの関心事となってきた。このフォーラムが発展していくつかのセミナーが催されて論文発表がなされ、また1986年6月にオレゴン州ポートランドで開催されたASHRAE年次総会でのシンポジウムとなった。



ポートランドのシンポジウムで発表された論文は、ASHRAE Transactions, volume 92, part 2に収録された。このシンポジウムで発表された論文の4編は性能検証が必要であることに同意を示しているが、性能検証とは何であり、どのように達成されるかについては4編とも意見が分散している。その見解は、機器の一つ一つに対してほぼ順序立った説明のある詳細な仕様書といったものから、ビデオテープと補足マニュアルを用いた保守手順および適切な性能データの文書化の方法に至るものまでであった。この他の性能検証への見解としては、システム性能を測定する現場試験の視点に立ったもの、システム受渡しに際するプロジェクトチーム内での責務の分担法などがあつた。

性能検証に対する関心から、ASHRAEは、ポートランドの会議での発表のビデオテープを作成した。シンポジウムの論文発表のテープとリプリントは、アトランタのASHRAEから入手できる。

同時期に、ASHRAEは、建築物のHVACシステムの性能検証に関するガイドラインを作成する目的で、特別委員会を設置した。この委員会が作成したガイドラインが、ASHRAEから発表されている。(訳注:このガイドラインは1989年版である)

試験調整請負者の業界団体であるAABC (Associated Air Balance Council) も建物の性能検証に注目してきた。この団体は、性能検証に関するセミナーを開催しており、試験調整作業の論理的拡張として、ビルHVACシステムの性能検証作業に試験調整業者を当てるのが筋の通った選択であると主張している。

## 討論

**Anthony S. DiFiglia, Vice President, TSBA Controls, Inc., Long Island City, NY:** 事例研究はどんなものでも有益です。Mark Smith氏の話は興味深いものでした。本シンポジウムのどの発表も優れたものでした。

**Kenneth M. Elovitz:** 発表を高く評価していただいたことに感謝します。事例研究は興味深いという意見には同感です。私の論文には具体的な事例の紹介と分析に紙面を割いています。セッションに分かれた口頭発表ではすべての論文をカバーできません。ほかの方々も事例研究を発表することは知っていましたが、その詳細については知りません。最初の発表者として、他人の見解を盗用したくはなかったので、私の発表では事例よりも性能検証に関する一般的な考え方に限定することにしました。

**Philip Haves, Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford, England:** あなたの用いた機能試験は完全でしたか?。何か見落とされる不具合や問題点は?。機能試験の手続きはマンパワーの観点から見て十分に効率的でしたか?十分でない場合の改善策は?。

**Elovitz:** 機能試験は、気象条件、システムの能力、建物の負荷などに制約されることがよくあるので、必ずしも完全ではありません。例えば、予熱コイルを利用

して冷却コイルに人工的な負荷をかけることはできるが、再熱コイルでは無理です。さらに、ある運転条件を取り巻く起こりうる環境のすべてを同定することは不可能です。同定できない条件をシミュレートすることはできません。したがって、起こり得るすべての運転条件を必ずしもシミュレーションすることができないという意味で、試験は必ずしも完全であるとは言えません。性能検証はしばしば、「持てる範囲のもので最善をつくす」事例の一つだと思います。それは、すべてをやり尽くせないから何もするまい、とするよりはるかに良いことです。

見落とす可能性が高い問題点は、長期の繰り返し運転の結果発生するようなものでしょう。かかる問題は多くの場合、振動や長期にわたる高温暴露と関連しています。製造上の欠陥や応用の不手際に起因する早期故障の傾向は、性能検証では明らかにならないことがあります。

ご質問にあるように、機能試験では効率的なマンパワー活用がうまくいかないことが珍しくありません。これは、結果がしばしば予想と異なったり、多分、何を示しているか希望どおりには明確に示されないからでしょう。マンパワー効率を改善するには、性能検証チームが「一石二鳥」を狙えるように、複数のサブシステムと要素の応答と相互作用を観察する眼をもって試験規定書を作成することです。これについては、私の「性能検証計画の展開」という論文の中で論じております。

**Jim Coogan, Principal Appl. Engineer, Landis & Gyr Powers, Buffalo Grove, IL:** 設計がいかに要件満たしているかについて設計者が説明するように勧告しておられます。そこにはどんな情報を盛り込むのですか?。誰が受けとめるのですか?どんな形で?

**Elovitz:** 規定の要件(設計基準)を設計がいかに満たしているかの説明は、会議またはレポートで行います。この説明には、設計が各設計基準をどのように満たすのかを記述すべきです。この問いに対して、設計者は自らの「設計思想(design review)」を述べることによって答えることができます。幾つかの例を示しましょう。もし設計基準が角部屋に対して個別ゾーンを要求している場合、設計者はゾーニングを描いたキープランを用意します。もし設計基準が1平方フィート当たり3.5ワットの冷却能力を要求している場合には、設計者は冷房負荷計算による割り当て熱量を示して、それが設計基準に等しいことを確認します。このようなステップを踏むのは単純に聞こえませんが、計算やシステム設計が、そのプロジェクト特定の設計基準とは異なる標準的なオフィスの考え方と経験とで行われてしまう事がなんと多いことか驚くべきことです。

**Harvey Brickman, Senior Vice President, Tishman Realty and Construction, New York, NY:** 貴方の発表とGPC-1Pとはどう異なるのですか?。

**Elovitz** : 私の発表の基本原理は、目的を「HVACシステム性能の確認と文書化・・・」と規定したASHRAE GPC-P1（現在のGPC-1）と一致していると思います。GPC-1ではチェックリストを作成しようとしています。私の論文では、より限定されない、一般的な解析方法の提案を試みています。私がGPC-1を読んだところでは、施工契約に基づく完全な性能は、請負者が設計図書に合致する、完全な、機能するシステムを引き渡す必要がある、という点では私の見解と異なっていません。