

事務所ビルの監視データから得られた教訓

Daniel j.Herzig,P.E. : ASHRAE 会員

Frederick F.Wajcs,Jr.,P.E.:ASHRAE 会員

訳 : 吉田 新一 中原 信生

要約

電気回路の大部分を需要者別に分岐供給した、床面積 $1,931\text{m}^2$ ($20,990\text{ft}^2$) の2階建事務所ビルが建設された。給気・還気ファン、ルーフトップ型冷凍機、1階床・2階床コンセント負荷、電気再熱器付VAVボックスはすべて個別に監視される。圧縮機の各気筒運転段数、および室内・外気温度も記録される。

入居開始より1年が経過し、建築物の暖房、換気、空調システムの性能検証が行われ、予期通りに機能していないことが明らかになった。性能検証過程で過度のダクト漏れ、不適切な制御方法、制御装置の誤動作が発見された。監視データは、性能検証前後にわたり得られている。

本報の目的は、この建物の設計意図と実際の性能との比較を行い、性能検証の必要性を立証する事である。また本報は現行の設計上の仮定に関する論議を喚起するはずである。

はじめに

本報の目的は、実際に監視された建築物の性能について、検証前と検証後の比較を行う事により、性能検証の必要性を立証する事である。設計上の仮定と施工とがこのビルの性能に影響を与えていたことから、この情報はそれらの再検討を促す筈である。本報によりビルシステムがどのように機能するのかをより良く理解し、将来の設計において最新の技術が適切に適用される事を望むものである。

本報のために監視を行った建物は床面積 $1,931\text{m}^2$ ($20,990\text{ft}^2$)、2階建の事務所ビルで、コネチカット州ブルームフィールドの緑の多い敷地に建てられていた。2色模様のブロック化粧版、緑がかかったガラス、そして盛土が周囲の景観とよく融けあっていた。これはエネルギー効率の優れた建物として設計され、初年度の光熱費を見る限り、この目標は達成されたかのように思われた。しかし、電気の端末需要者の99%をカバーしている監視データから、この建物が最良の状態では機能していない事が示された。

この設計は1989年に始まり、入居開始は1990年7月であった。この建物は、従業員数100人までのエンジニアリング会社のための事務所ビルとして設計された。このビルディングのHVACシステムはシングルパッケージの変風量(VAV)ルーフトップ型ユニットで、ペリメータ用には電気再熱器を組込んだ並列加圧ファン方式VAVユニットを、インテリア用には閉止機能付VAVユニットを備えている。冷房は2基の電動往復動コンプレッサーによる直膨式システムで行なわれる。非就業時間帯および朝の予熱時間帯の暖房は、屋上にある、天然ガス焚きファーンネスによって供給される。装置は居住者による遠隔設定変更機能を備えたDDCユニットによって制御される。

この建物の設計と施工は同地域の事務所ビルによく見られる典型的なものであった。所有者は建築業界の主要関係者であることから、この建物の質は他のほとんどの建物よりも優れていると考えられた。所有者は、この建物の唯一のテナントであるエンジニアリング設計会社を設立した二人の協同経営者である。彼らの会社は、同地域では最大級の会社の一つである。機械設備の請負者は評判の良いデザインビルド(設計・施工会社)で、高品質の仕事をする事で知られていた。所有者は会社経営で非常に忙しかったが、常に設計と施工作業の先頭に立っていた。彼等は主要な意思決定を自ら行い、詳細設計は別のその仕事の担当者によって処理されるものと考えていた。

所有者と設計チームは、エネルギー効率の優れた建物を希望していた。そこで、設計段階から地域の電力会社の省エネルギー負荷管理プログラムに参加した。その電力会社はDOE-2を用いてエネルギーシミュレーションを行い、技術者の意思決定を支えるとともに幾つかの省エネルギー手法に対する電力会社からのインセンティブ(報奨金)の根拠とした。また、プログラム評価の事例研究として、様々な電気負荷を分割するために追加が必要な盤と回路のための資金も提供された。監視装置は入居開始より約6ヶ月後に設置され、下記のデータが15分間隔で記録された。

Daniel j.Herzig,P.E. : コネチカット州ブルームフィールドのBVH Engineers, Inc. の最高責任者(Chief executive officer). Frederick F.Wajcs,Jr.,P.E. : コネチカット州バーリンのNortheast Utilities,省エネルギー負荷管理部長 (Senior program administrator)



図1 電力需要量監視データ

- ・1階照明負荷、昼光照明削減補助メーター付き
- ・1階加圧ファン方式 VAV ユニット, 電気再熱器付き^(*)
1)
- ・1階コンセント負荷
- ・2階照明負荷、昼光照明削減補助メーター付き
- ・2階加圧ファン方式 VAV ユニット, 電気再熱器付き
- ・2階コンセント負荷
- ・ルーフトップユニットの給気および還気ファン
- ・ルーフトップユニットの冷凍機
- ・圧縮機運転の各段毎の稼働時間
- ・外部照明
- ・1階室温
- ・2階室温
- ・還気温度
- ・給気温度
- ・外部気象条件、乾湿球温度・風・日射を含む

監視データの最初の情報は、1991年6月に所有者と設計チームに提示された。情報の正確さと信頼性が確認されるまで情報の所有者への提示は延期するとの決定が、電力会社によってなされた。延期した理由はまた、建物の運転に影響を与えないように、従ってまた、建物のエネルギー消費量の初期の値に偏見を持たないようにするためのものでもあった。ビル性能に関して初めに提起された疑問点は、ペリメータ用電気再熱器の運転に関するものであった。ビルの情報を示す最初のグラフでは、午前7時に電気加熱による突出が示されていた。設計意図では、電気加熱は就労時間以前にピーク電力需要に達してはいけないことになっていた。給気・還気温度を含む他のデータを検討すると、ビルシステムの運転に関する他の疑問点が浮かんできた。1991年2月の監視データのグラフを図1に示す。

予備的な修正が6月に実施され、7月には調査が開始された。ビルデータ監視と運転改良が継続的に行われたが、性能検証過程の大部分は1991年8月末までに完了した。

シミュレーション、設計および居住実態統計の比較

この建物は、一週間5日半居住の事務所ビルというスケジュールでシミュレーションが行われた。平日の午前8時から午後5時までは100%居住、午前7時から午前8時までと午後5時から午後6時までは25%居住と仮定された。また、土曜日の午前8時から午後1時までは25%の人々がこの建物内に居ると想定された。実際の居住状態はそれほど単純なものではなく、エンジニアリング会社の仕事量に対応していた。プロジェクトの締め切りが迫

った時には週末を含めて居住時間は長くなり、市場が厳

しくなると短くなった。さらに、会社は計画通りには成長せず、実際の居住人員は60人であった。

居住スケジュールに従って10.8W/m²(1W/ft²)の機器負荷がシミュレーションでは用いられた。建物の機器負荷は、居住者がこの建物を離れるとゼロになると仮定された。実際の機器負荷はピーク時で13,000Wつまり6.7W/m²(0.62W/ft²)となり、就労日中は10,000W以上を保持していた。夜間の需要は、自動販売機、LAN コンピューターシステム、およびその他の事務機器・建築設備が平均で2,500Wであった。設計者はピーク冷房負荷計算からして設計装置容量を16W/m²(1.5W/ft²)と設定した。

照明システムは、646ルクス〔60FC (フットキャンドル)〕を維持するために11W/m²(1.0W/ft²)の値がシミュレーションに用いられた。平日の午前7時から午後7時までと土曜日の午前8時から午後1時まででは、100%の照明が点灯されるものとした。また平日の午後7時から午後11時まででは、50%の照明が使われるものと想定された。シミュレーションでは居住者センサーは無く、窓際の昼光制御はあるものとした。居住スケジュールと同様、実際の照明スケジュールを記述するのは非常に困難であるので居住者センサーも設置されている。この居住者センサーと昼光制御が実際の接続照明電力密度10W/m²(0.9W/ft²)に与える影響により、実効照明負荷を約9W/m²(0.8W/ft²)に抑えることができた。この値は、設計者がピーク冷房負荷算定で使用した27W/m²(2.5W/ft²)より少ない値である。

HVACシステムのシミュレーションは、建物負荷と100人の居住者に見合うように実行された。新鮮外気導入量は一人当たり、居住時間帯内は34m³/h(20cfm)、時間帯外は0m³/hとした。DOE-2プログラムにより負荷が算定され、シミュレートされた条件を満足するユニットが選択された。屋上に設置されたVAVユニットは設計者の算定負荷に見合う大きさにされた。設計者は、居住者の設計条件を170人に想定し、これに34m³/h(20cfm)の新鮮外気を供給するものとした。ピーク冷房負荷算定に対しては負荷率の80%を居住者数に適用した。シミュレーションと設計者の両方とも給気量として42,500m³/h(25,000cfm)つまり22m³/h・m²(1.2cfm/ft²)を用いた。6段階のアンローダーを持つルーフトップユニットがシミュレーションに利用され、実際に設置された。建物の設計意図ならびにシミュレーションにおける運転方法は、ルーフトップユニット内にガス式ファーンを設けて、非居住時間帯および早朝の予熱運転時に必要に応じ建物の暖房を行うことになっていた。居住時間帯における事務室の暖房は、ペリメータの加圧ファン方式VAVユニットによって賄われる。第一段階では、VAVユニットのファンが天井プレナムより暖気と、換気用空気量を最低限に絞ったルーフトップユニットからの一次空気を吸込んで暖房が賄われる。第二、第三段階の暖房は、VAVユニット内のファンと共に電気再熱器を稼働させ、1次給気は最小限に抑える。別個に、手洗いおよび青写真複写機が設置された部屋のために排気用ファンが取り付けられた。

シミュレーションは設計プロセスの初期段階に行われた。建物の基礎図と立面図は完成したが、壁断面と屋根断面の設計および電気設備とHVACシステムの設計は開始されていなかった。シミュレーションに使われる建物特性は、当時の建設実施状況をベースに、電力会社によって作成された最高基準パラメーター(maximum baseline parameter)シートから採用した。シミュレーション用の居住特性とシステム選定にあたっては、設計技術者達によるブレインストーミングが行われた。最高基準パラメータは、「電力会社の協力がなかったならば、どのような建物が建てられていたか」を反映するために、電力会社によって作成されたものである。これらのパラメータにより、インセンティブの超過支払いとエネルギー意識の高い設計者へのペナルティーを減少することができる。設計チームは、設計業務に当たって彼ら独自の基準と手順を用いた。設計チームは設計に対する全責任を負ったため、シミュレーション戦略を設計に取り入れる義務はなかった。しかし、所有者が特定の戦略を設計に取り入れることに合意した場合には、設計チームは、電力会社からのインセンティブを得るために、設計内容がこれらの戦略に合致するかどうかを確かめる必要があった。表1は、シミュレーション値、設計値、実際設備の値、居住者数などの差異を、各特性値ごとにリストしたものである。表中の実際のエネルギー消費量は、性能検証過程前後の期間を含んでいる。

設計基準とシミュレーションにおける仮定条件との比較により、設計者に幾つかの過大設計が見られる。この過大設計は、建設中に起こりうる変更や欠陥、入居後の用途変更を補償する為の安全率である。建物のエネルギー性能が悪化している様子は見られない。事実、「居住開始時にふつうに起る」問題以外は、利用者から重大な問題は報告されていない。

冷房の過大設計は、各段階の運転時間監視記録に示されている。運転時間の95%は圧縮機が半分以下の能力で運転されていた。ユニットは十分な圧縮機数を備えていたため、ユニットのエネルギー消費量は増加しなかった。実際には、ユニットのエネルギー消費率(EER)は部分負荷において増加する。表2には圧縮機の各シリンダーの運転時間とエネルギー消費率を、運転シリンダー数の増加と関連させて示した。

安全率は、HVACシステムの選択に影響を与え、予定された制御戦略に関する問題以上に、運転上の問題を生み出す可能性もあった。主要な問題はペリメーター部の過冷却で、これは、インテリア部を満足させる温度に設定した給気流によって生じたものであった。ペリメーター部の建物と家具の質量は、予熱サイクル時間中には居室の温度に達しなかった。ペリメーター部の内部負荷は、これらの熱容量を加熱しさらに外皮の熱損失を賄うには不十分であったので、低温に過ぎる給気温度のために電熱再熱器が過度に働いたものであった。これは冬期に予

表1 建築物の基準値の比較(訳注:単位換算値)

特性	シミュレーション	設計	実際
居住者数	100	170	60
機器コンセント負荷 (W/m ²)	11	16	6.6
照明負荷 (W/m ²)	11	27.5	9.9
ピーク冷房負荷 (MJ) 訳注	369,355	759,600	506,400*
ピーク暖房負荷 (MJ) 訳注	430,638	527,500	527,500
給気風量 (cfm/ft ²)	1.2	1.2	1.2
外気取入れ風量 (cfm)	2,000	3,420	3,420
年間エネルギー消費量			
電力量 (kWh)	204,156	計算せず	232,800
最大需要電力量 (kW)	99	計算せず	157
天然ガス (Cm ³)	96	計算せず	93
MJ/m ²	568	計算せず	613

*実際の運転時間の97%相当。5段目と6段目が実際に運転された理由は、それらは予冷時に利用されたからである。

訳注: 原書では単位がMBtu,これを MBH=1,000Btu/h と理解すると上表のごとく MJ 単位の数字になるが,これは妥当な数値の1000倍である.多分,単位の書き違い(MBtu→Btu/h)か数字の書き違い(コンマ→ピリオド)であると思われる.これらの単位をkJと理解するとすべてが妥当な数値で整合する。

表2 空調機の運転時間と効率

圧縮機段数	運転時間	割合%	エネルギー消費率(EER)
1 段目	856.6	54.5	11.3
2 段目	462.3	29.4	11.3
3 段目	176.2	11.2	11.0
4 段目	52.3	3.4	11.0
5 段目	16.1	1.0	11.1
6 段目	8.1	0.5	10.2
合計	1,571.6	100%	

想以上のピーク電力需要を引き起こした。夏期には、この問題は顕著に現れないが、湿度上昇の懸念がある。

性能検証過程の作業

建物が設計通りに機能していないという最初の兆候は、監視データに表れた。建物の時間別電力需要合計のグラフは、午前7時にスパイクの発生を示した。これは、電気再熱器付加圧ファン方式VAVユニットのスパイクの発生と一致している。他の監視データを詳細に検討すると、所有者の気がついていない、建物性能に関する他の問題があることも明らかになった。電気による再熱に加え、建物内の温度は居室室温のままでセットバックは無く、還気温度は建物の正常負荷での期待値より低く、そして同時暖冷房が過度に働いていた。

外気温度が7.2°C (45°F)を超えた時点で電気再熱器を遮断するという応急手段がとられた。これにより、性

性能検証過程を計画し、実施手順を計画する時間的余裕がうまれた。その方法は、すべての問題を研究し、問題を隠すのではなく解決するような改修作業を策定することであった。

居住時/非居住時の温度問題の原因究明は容易であった。いくつかの設定変更ボタンが動かなくなり、屋上ユニットが居住時間後も居住時間モードのままになっていた。欠陥のある制御パッドが発見され交換された。これはDDCシステムの制御方法の再検討中に行われた。

加圧ファン方式VAVユニットでは、ファン周辺の可変開口部覆い板が最小開口状態に設定されていた。これにより、ペリメータ空間に供給されるはずの温風の風量が制限され、低い空気温度となったために電気再熱器が稼働し、風量不足のために加熱時間の長期化が起こった。覆板の開口部を広げた結果、ペリメータの快適性は改善された。

給気温度は還気温度に基づいてリセットされるべきであった。しかし、還気温度が異常に低いために給気温度は、不安定になっていた。分析により給気ダクトからの漏れが、仕様書に規定された5%よりも多い事がわかった。風量・温度の計算から、過度のダクト漏れが確認され、25%と数量化された。検査により、請負業者が仕様書に指示されていた接合部へのシーラント塗布を行っていなかったことが確認された。請負業者が接合部外部にシーラントを塗布し直した結果、漏れは3%以内に低減した。

また性能検証期間中に、屋上ユニットの給気ファンの風量変動し、圧縮機の稼働状況が不安定になることも明らかになった。不安定な圧縮機の稼働は、監視データの圧縮機稼働時間にも影響を与えていた。この給気量の問題は、屋上ユニットの静圧コントローラーの欠陥が原因であることがわかり、メーカーによって交換された。この冷房用圧縮機のコントローラーは、エコマイザー稼働時は給気温度が1.7°C (3°F)だけ低くなるようにリセット用コントローラーにより制限されていた。これが過度の再熱と居住者からの苦情をひきだしていた。2度目の暖房シーズンには、より優れたリセット機能を持つ制御装置に変更することが決定された。コンピューター内の制御のロジックと戦略は、設計意図を反映し再熱を最小限に抑えるように変更された。

上述の設備およびシステム関連の問題は、性能検証過程を通して同定し改修された。この性能検証過程により、約4,700ドルのエネルギー経費が節約され、建築物の保証期間内に問題が発見されたため、所有者にとって2,100ドルの修理費が節約されるものと見積られている。

教訓

主要な教訓としては、インテリア部とペリメータでは建築の動特性が異なるので、これを区別して検討する必要があるということである。

1つのシステムでは、両方のゾーンに、適切な組み合わせの給気温度と風量を提供し快適な状態を維持することはできない。内部発熱の少ない建物のペリメータゾーンに対しては、ビルの規模に基づく熱的遅れを考慮に入れて、より高温の給気温度とより長時間の予熱サイクルが可能な別のシステムを考えるべきである。

熱心に監視採取したデータがあれば、必然的に学習の過程を通して建築の動特性をより深く理解できるようになる。これらのデータにより議論が喚起され、実際に問題を解決する行動に結びついた。監視データによって、仮定条件に関連した不確定要素を最小限に抑えることができるので、これらのデータは問題の存在箇所を示す良い指標にもなる。エネルギー消費の監視データとDDCコンピュータからのトレンドログを組み合わせることで、建築物の動特性についての議論が容易になり、静的な定常状態を仮定した解決策の誤用を回避することができた。

調整報告書に示されている結果は、個別に確認する必要がある。通常の場合と非常時の状況のすべてについて確認すべきである。大半のゾーンと異なるゾーンについては、特に注意を払う必要がある。

居住者用設定変更器は思ったほどの利益は無さそうである。位置が不適切であったりボタンが固着したりして知らないうちにエネルギー消費を増加させている可能性もある。より耐久性のあるユニットを選択するとか、その機能を別の制御器に組み合わせて入れ込むといった方法がより適切な解決策となる場合もあるだろう。より良い機器が見つかるまでは、遠隔場所からの設定変更は避けた方が安全であろう。

他に得られた教訓は、業界内の傾向をよりよく知ることが出来た点であった。室内状態を満足させるためには制御装置と設備機器との通信が必要である。パッケージユニットに通常付随している基本制御装置では建物の動的負荷には殆ど対応できない。HVACの設備機器は室内の要件を満たさなければならず、その応答は制御信号に適合していなければならない。機器の制御ロジックは、システムの制御戦略を補完するものでなければならない。機器のロジックも制御システムのロジックも、室内の実際の利用形態に適合するように戦略を変更できるプログラム能力を有する必要がある。

性能検証を行う理由は、単純、基本的、そして良いことであるが、所有者にプロジェクトの性能検証を実施するための資金準備の要を確信させることはやはり難しい。このビルは、HVACシステムが単純で、請負業者が十分に信頼でき、所有者と設計チームの知識レベルが高かったために、当初性能検証は行われなかった。実際の建築物の運転状況について図表を使って説明して、初めて性能検証過程が行われることになった。最もよく知られている種類の建物である単純な事務所ビルでも性能検証過程が必要であることが実証されたので、より複雑な建物で性能検証過程が必要なことは疑いのないところであろう。

結論

監視システムを採用する資金的余裕がある建築物の所有者は、多くはいない。しかし、多くの所有者がHVACシステムのためにDDCシステムを使用しているか、または必要としている。未開発であるがDDCには優れた診断能力があると思う。DDCコンピューターと、ASHRAE/IEA規格90.1-1989に記載された個別配電幹線上に設けた電力計を戦略的に組合せることにより、建物の設計と運転を改善する能力をさらに拡大することができる。このタイプのハイブリッドシステムは、建物のエネルギー消費設備がどのように機能し、HVACシステムがその負荷に対してどのように応答するかについて同時に記述することを可能とするであろう。全体が統合された構造物として建物がどのように機能するのかについての理解を深めるためには、エネルギー消費とシステム性能に関する情報が必要なのである。

設計者によって用いられる設計上の仮定条件は、テナントの要求を満足し、苦情を最小限に押さえるような設計をクライアントに提供するために設けられてきた。これらの仮定は広範囲な居住状態、テナントの要求、機器の負荷状態ならびに施工品質をカバーしなければならない。運転およびエネルギー消費量の基準に対するより優れた知識ベースを持つことによって、設計対象ごとに適切な仮定条件を設定する助けとなるであろう。この知識は、フレキシビリティを望むクライアントの要求を排除するものではなく、建物の使用が開始された後の状況を考慮に入れた設計を設計者が行う際の助けとなるものでなければならない。DDCシステムに監視ポイントを慎重に追加することにより、設計者は、クライアントの要望を満足させるために求められる変更を行うのに必要なフィードバックを与えることが出来、また実際に居住する人々のために快適な環境を提供することが出来なければならない。HVACシステムでは、実際の負荷状況のもとで快適性を保持するような変更を加えることができるように、フレキシブルな運転計画と制御戦略を設計に盛り込まねばならない。

監視データは、システムがどのように作動するかということ、およびエネルギーシミュレーションモデルが正確な予測を可能にするということを納得させる証拠作りを行う唯一の手段である。建物がどのような性能を有するかを数量化し、設計を改善することができるということを認識したなら、クライアントの要求を満足させる以上の方針が立てられるはずである。我々は従来の方法に挑戦し、能力を拡大し、新たな技術を開発しなければならない。監視データの結果を研究すること、性能検証手順を開発することは、クライアントにより良いサービスを提供するための進歩した環境を創造する上で有効な道具となるであろう。

討論

PeterSchwartz, カリフォルニア州サンフランシスコ

Pacific Gas Electricの上級マーケティング・エンジニア:ビルでのエネルギー使用を監視するための費用はいくらでしたか?。どれ位の期間監視しましたか?。電力会社が監視料金を支払ったのですか?。

ビルの熱負荷の推定値は実際の負荷より大きかったわけですが、実際のエネルギー使用量とキロワットのピーク値はシミュレーションの結果より大きくなっています。これについてはどう説明しますか?。運転時間のせいでしょうか?。

FrederickF-Wajcs, Jr.:1991年2月から1992年9月までの20ヵ月間建物の監視を行いました。監視および報告にかかったおおよその費用は、個別回路ごとに6,000ドル、メーターとデータ収集システムの設置に50,000ドル、報告およびシステムの維持保全に月当たり2,000ドル、最終報告に20,000ドルかかりました。これらの費用はすべて電力会社が負担しました。

一般に照明およびHVACシステムの使用時間が、エネルギー消費量の多い理由の大半となるものです。しかし、DOE-2シミュレーションは、電気暖房と冷房機器のエネルギー消費量を少なく見積もっていたようです。モデルがどうしてピークデマンドを少なく見積もってしまうのか、原因については現在もなお調査中です。

AdrianTuluca, コネチカット州ノーウォークのSteven Winter Associates社長:いくつかの事務室は冷房しすぎだとおっしゃっていましたが、VAVユニットはどの程度まで開度を低く維持することが出来るのでしょうか?なぜ電気抵抗コイルが早朝の予熱暖房時間に稼働したのでしょうか?

Wajcs:, VAVユニットは少なくとも $9.2\text{CMH}/\text{m}^2$ ($0.5\text{cfm}/\text{f}^2$)を維持するよう設定されていました。装置はより低い設定が可能かも知れないし不可能かもしれません。

ペリメータ空間の暖房が必要だったため、通常の居住時間帯(時刻を基準にした)以前に電気再熱器が使用されていました。早朝予熱の初めにはルーフトップユニットのガス暖房炉が利用されました。この予熱サイクルは、空気温度が居室の設定温度に達すると停止するようになっていました。空気が空内の物体より早く暖められることと、内部発熱が少なく、しかもペリメータの熱損失もある状態だったことによって、制御システムがいまや居住時間帯であると認識していても、この負荷を満足させるために電気再熱器を稼働させてしまったのです。