

BEMS データ分析による空調運用の最適化

秋山 智宏 Tomohiro Akiyama, 原 綱義 Tsunayoshi Hara, 武藤 文乃 Ayano Muto

[要 旨]

アンリツはサステナブル経営の一環として、事業所設備の ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)化を目指している。アンリツグローバル本社棟の空調は、従業員の快適性を最優先し各フロアで制御しているが、消費電力の観点から、より一層の効率化が求められていた。消費電力抑制の施策検討に際しては、大量に蓄積されていた BEMS(Building Energy Management System)データの活用が必要であった。データ分析チームにより BEMS に蓄積された温湿度や空調の稼働記録などを見える化することで、空調管理における問題点を抽出した。また、空調管理部門とディスカッションを重ねることで、空調運用の改善策を導出した。さらに、冬期の空調運用において全体空調の稼働開始時刻と設定温度を見直すことでフロア個別の空調稼働を抑制する施策を展開し、各フロアの快適性を損なわずにピーク消費電力を約 12%削減できることを実証した。

1 まえがき

アンリツは創業 120 周年を迎えた 2015 年、グローバル本社棟(以降 G 本社棟)を竣工した。G 本社棟は、安心・安全で快適なオフィス空間を実現するとともに、地球環境に優しい省 CO2 とサステナブルな社会づくりに貢献するため ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)化を目指している。すでに 2015 年度実績として、2013 年度比で 57.6% のエネルギー削減を達成しているが、今後 ZEB 化を達成するためには、さらなるエネルギー削減策の推進が必要不可欠となる。

G 本社棟のエネルギー消費量は、その半数以上を空調電力が占めている。しかし G 本社棟の空調は、従業員の快適性を最優先に考え、フロアごとに自由に ON/OFF や温度設定を変えられるようにしているため、その利用実態と問題点が把握できていない状況であった。空調電力を削減するためには、各フロアの温湿度や空調の稼働データを元に、現状把握を行ったうえで、省エネ対策を検討する必要がある。

2 G 本社棟の空調管理システム

2.1 空調設備の構成

G 本社棟の空調設備の構成を図 1 に示す。

G 本社棟の空調設備は、各フロアで制御可能な個別空調機、フロア全体の換気および加湿を担う外調機、外調機用の冷水/温水を供給するチラー、気象条件により自動で開閉する自然換気システムで構成される。

個別空調機は各フロアで制御可能だが、中央監視装置から遠隔停止も可能となっている。個別空調の消し忘れ対策として、定時後

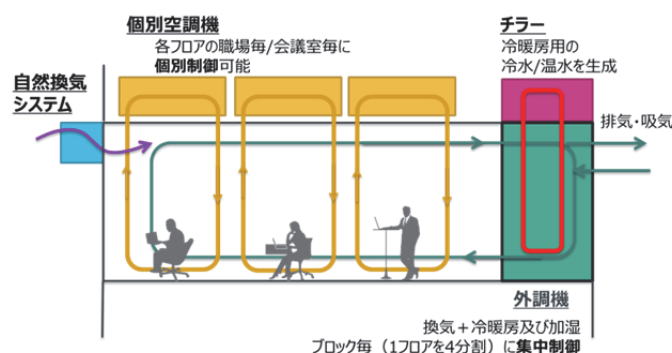


図 1 空調設備の構成

2.2 BEMS システム

G 本社棟には、BEMS(Building Energy Management System)が導入されている。G 本社棟の BEMS では、空調や照明など建屋全体の電力量を管理できるだけでなく、空調発停の情報、照明の ON/OFF など 5,000 ポイント以上のデータを記録・蓄積している。

2.3 課題

BEMS にてさまざまなデータが蓄積されるようになったが、空調管理部門では、建屋全体の電力量や温度の推移データなどマクロ的な視点でのデータ活用に留まっていた。

従来、各建屋の空調は集中管理にて運用されており、蓄積された大量データの分析ノウハウや、個別の機器の情報を活かした運用の知見がなかったことが、データ活用が進まなかった理由であると考えられる。また、BEMS のデータ表示機能が十分でなく、データ分析のためには BEMS からデータを csv(comma-separated values)で出力し表計算ソフトで加工する必要があるなど、手間がかかることもデータ活用が進まない一因となっていた。

3 BEMS データ分析による空調運用改善策検討

3.1 検討の進め方

前述の課題を解決するため、データ分析チームと、設備管理チームの共同検討体制をとることとした。BEMS データの分析に関しては、統計的手法やソフトウェア構築ノウハウを持つデータ分析チームが担当することとした。データ分析チームによるデータ分析・データ見える化結果を元に、空調運用管理ノウハウを持つ設備管理チームとディスカッションを重ねることで、現状の問題点の把握と解決策を効率的に導出することができると考えた。

3.2 データ分析方法

(1) 分析データ

データ分析に使用したデータの一覧を表 1 に示す。

表 1 データ分析に使用したデータ

データ種別	単位	ポイント数	収集周期
室内温度	℃	30	1 時間ごと
室内湿度	%	30	
外気温度	℃	1	
外気湿度	%	1	
個別空調制御	ON/OFF	116	—
外調機制御		20	—
個別空調積算電力	kWh	97	1 時間ごと
外調機積算電力		20	
チラー積算電力		2	

- * データ収集期間:2015/7～2017/1
- * 対象フロア:2 階～6 階(建屋は地上 7 階)
- * 各データは、データ分析用にクレンジング処理(異常値の除外、欠損データの処理等)を行っている。

(2) 分析環境

データ分析に使用したツールを表 2 に示す。

表 2 分析ツール

使用ソフトウェア	用途
R version 3.4.2	統計, データ解析ツール
RStudio Version 1.1.383	R のコマンド UI, 結果表示

3.3 データ見える化による現状把握

BEMS データ分析を実施し、複数の視点で見える化を行った。

(1) 空調電力量

G 本社棟全体の空調種別ごとの電力使用量を図 2 に示す。

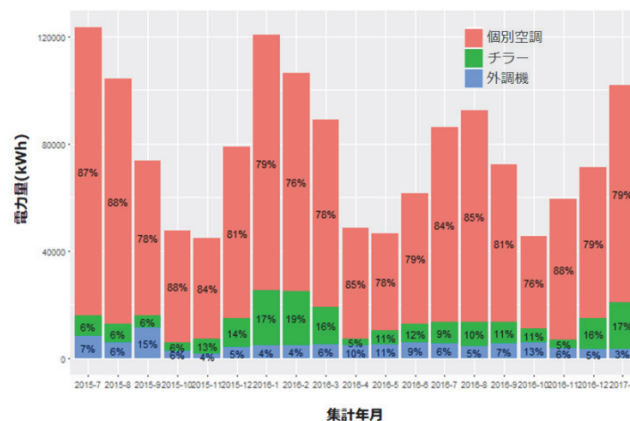


図 2 空調種別電力使用量

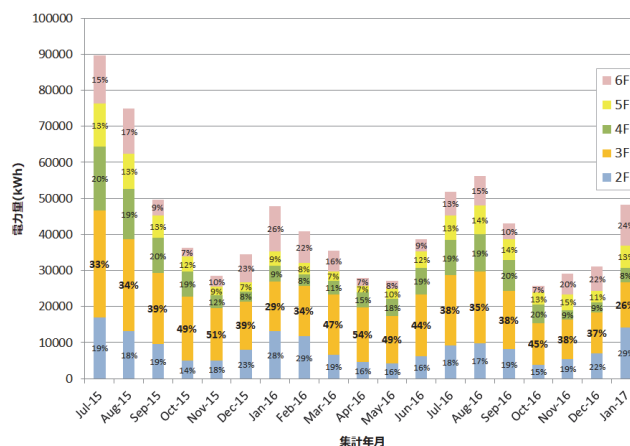
図 2 をみると、個別空調が年間通じて全体の約 8 割を占めていることがわかる。また電力量は夏期(7～8 月)と冬期(1～2 月)にピークとなることがわかる。

(2) フロア別個別空調電力量

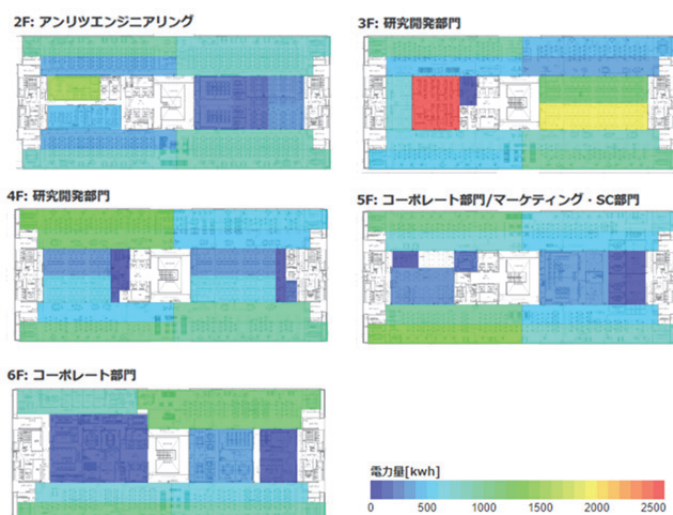
空調電力量の 8 割を占める個別空調について、フロア別および空調エリア別の状況を把握するための分析を行った。対象フロアは 2 階～6 階とした。外来者用フロアである 1 階と設備管理用フロアの 7 階は除外した。

個別空調電力量のフロア別集計値を図 3a に、空調エリア別の電力使用量のマップ表示を図 3b に示す。

図 3a フロア別空調電力量をみると、季節により変動はあるが、3 階の空調電力使用量が全体の 4 割程度を占めていることがわかる。さらに図 3b フロアマップ表示をみると、3 階の一部のエリアが突出して消費電力が高いことがわかる。このエリアはマシンルーム(24 時間空調稼働)であった。マシンルームを除いたエリアの傾向として、建物中央部よりも窓側エリアの空調電力が高い傾向にあることがわかる。



a. フロア別個別空調電力量



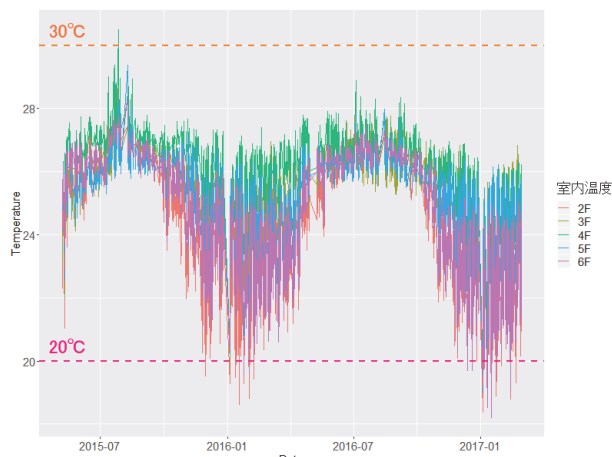
b. 個別空調消費電力のフロアマップ表示

図3 個別空調電力量の見える化

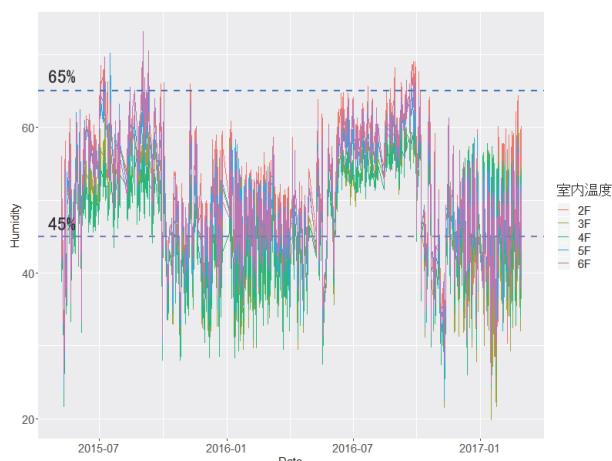
(3) フloor別温湿度

フロアごとの温湿度の状況を図4に示す。

フロア別の室内平均温度の遷移を図4aに、フロア別室内平均湿度の遷移を図4bに示す。また各フロアマップに温度測定位置を示した図を図4cおよび図4dに示す。



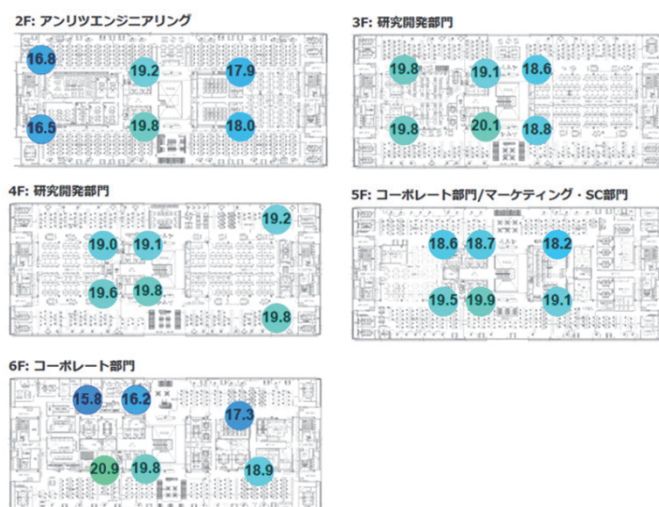
a. フloor別室内温度の遷移(平日勤務時間帯)



b. フloor別湿度の遷移(平日勤務時間帯)



c. フloorマップ表示(2016/8 最高室内温度)



d. フloorマップ表示(2017/1 最低室内温度)

図4 フloor別温湿度の見える化

室内温度に関して図4aをみると、すべてのフロアで20～30℃の間でコントロールされていることがわかる。

室内湿度に関して図4bをみると、季節による変動があるが、おおむねコントロールされている。冬期において、まれに湿度が20%近くまで低くなることもある。

フロアマップによる温度分布をみると、図4cの夏期に関してはフロア間に大きな差異は見受けられないが、図4dの冬期においては2階西側および6階西側が寒い傾向になることがわかる。これは構造上2階窓側の床が1階の回廊部になっており外気の影響を受けやすく、6階は天井面が外気の影響を受けやすいことに起因すると考えられる。

図3b電力量のフロアマップでは、窓側の消費電力が高い傾向となっていたため、窓側は暑いもしくは寒い状態になっていると推測されたが、温度センサの設置場所が建物中央側に位置しているため、傾向が確認できなかった。

(4) 快適度(不快指数)

快適度を測るための指標として、不快指数を採用した。

不快指数 DI は、

T=乾球気温(℃), H=湿度(%)としたとき

$$DI=0.81T+0.01H(9.99T-14.3)+46.3$$

で計算される。

不快指数の数値と体感について、表 3 に示す。

表 3 不快指数と体感

不快指数	体感
85～	暑くてたまらない
80～85	暑くて汗がでる
75～80	やや暑い
70～75	暑くない
65～70	快い
60～65	何も感じない
55～60	肌寒い
～55	寒い

表 3 において、不快指数 60～75 の間が快適な範囲とされている。

図 5 に、フロア別の平日勤務時間帯における不快指数の遷移をバイオリンプロット表示で示す。

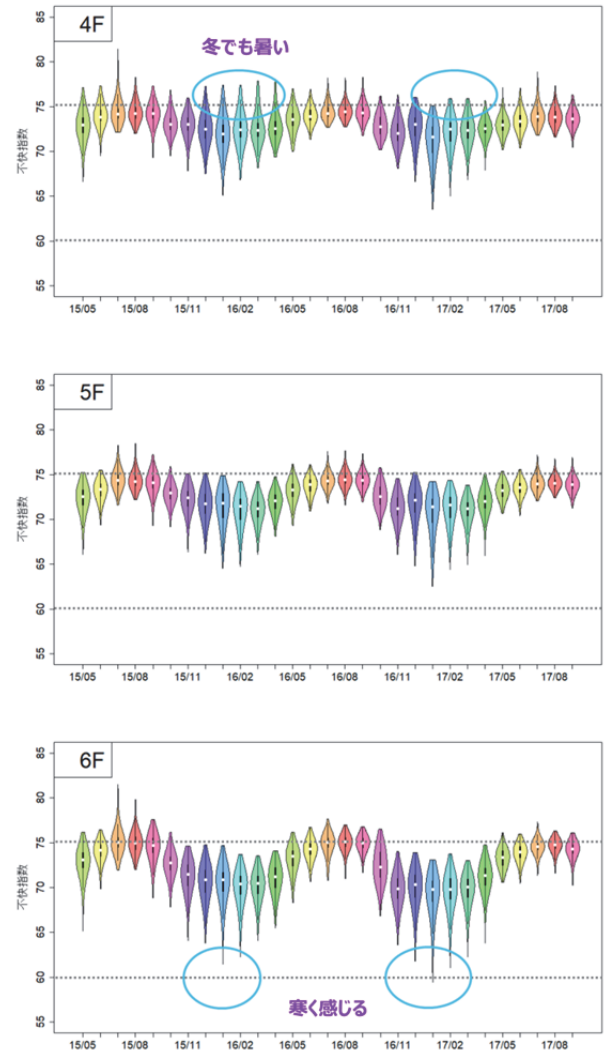
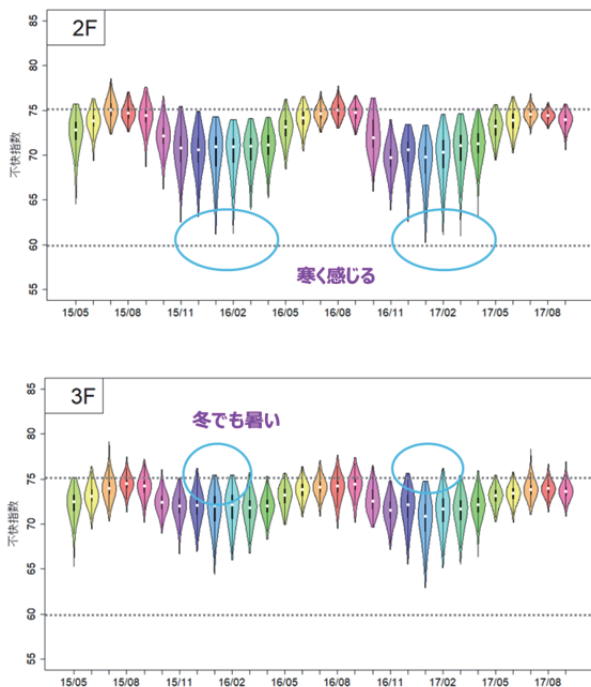


図 5 フロア別不快指数の見える化

図 5 をみると、年間通して不快指数の中央値が不快指数 70～75 の範囲となっており、快適な範囲ではあるが暑く感じる領域に近くなっていることがわかる。

季節ごとの傾向をみると、全フロアで夏期(7～9 月)に不快指数が 75 を超え、暑く感じる状態が多くなる。冬期(12～2 月)に関しては、2 階および 6 階は不快指数が 60 近くまで下がる傾向となる。また 3 階および 4 階においては、冬期においても不快指数が 75 を超え、暑いと感じる状態になることがある。

(5) 空調制御

各フロアの空調制御の状況を把握すべく、空調の発停情報の見える化を行った。

図 6 では、空調制御の状況を見える化するため、横軸に空調ブロックを、縦軸に時間を表示し、空調が ON している時間を赤く表示している。この結果からは、夏期および冬期

は外気温に対応して ON/OFF をこまめにするケースは少なく、朝出勤して ON したら帰宅時もしくは 18:00 の自動 OFF まで制御されないことが多いことがわかる。

冬期に関しては、3 階および 4 階は空調が ON されないことも見受けられた。建物自体の断熱性が高く、吹き抜けなどを通じて下階からの熱が伝わってきているため個別空調を稼働せずとも快適な温度になっていることが推測される。

春秋期に関しては、各フロアで運用が異なるが、一度空調を ON した後はそのままになっていることが多いことがわかる。

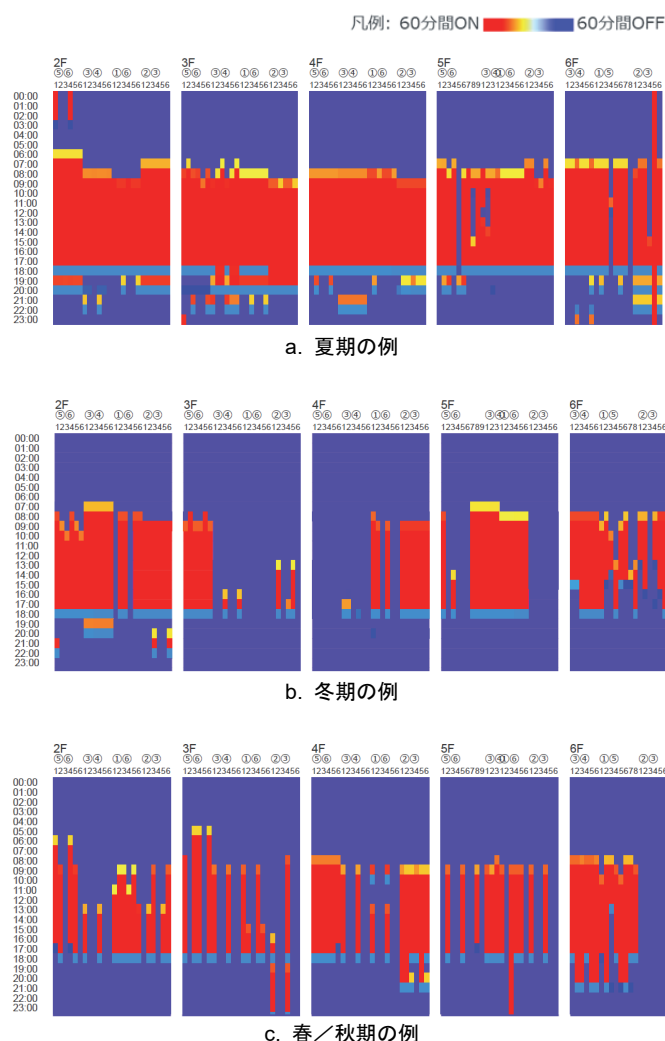
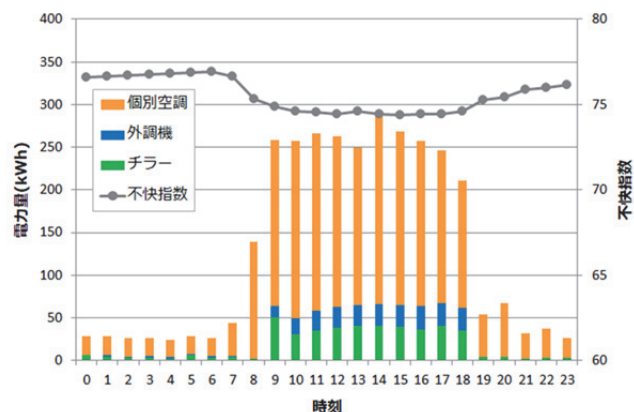


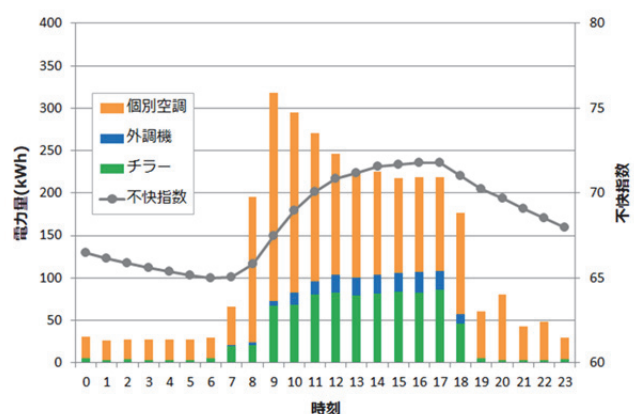
図 6 個別空調 ON/OFF の見える化

(6) 空調電力と不快指数の時刻変動

空調電力量が多い夏期と冬期において、空調電力と不快指数の時刻変動を確認した。



a. 空調電力と不快指数の遷移(2016/8)



b. 空調電力と不快指数の遷移(2017/1)

図 7 空調電力量と不快指数の時刻変動

図 7a の夏期における、空調電力と不快指数の時刻変動をみると、勤務時間内は電力量がほぼ一定であることがわかる。出勤後にエアコンを稼働し、そのまま定時後まで連続稼働するケースが多いためと考えられる。しかし不快指数は 75 近くで推移しているため、場合によっては暑く感じる従業員もいることが推測される。一方、図 7b の冬期における時刻変動をみると、出勤後から午前中の空調電力量が高くなり、午後になると落ち着いてくる傾向であることがわかる。出勤時にフロア全体が寒く、午前中に一斉に空調を稼働するためと考えられる。不快指数に関しては、出勤時に下限近くとなっており、寒く感じるが多いと考えられ、午後になると不快指数が 70 を超え、暑く感じる領域に近づいている。

3.4 問題点抽出

データ見える化結果を元に、ディスカッションを行い、空調電力の視点、快適性の視点で問題点を抽出した。

(1) 空調電力の視点

- ・ 空調電力量は冬期と夏期にピークとなる。特に冬期は出勤後一斉に空調稼働されるため午前中の電力消費量が

多くなる。電力量の積算値よりも、消費電力のピークを抑制することが重要で、改善の必要がある。

- ・ 1 年を通じて外調機が活用されていない。特に出社前に外調機を稼働させることで、フロアの温度をいち早く適正にし、個別空調の負荷を下げられるのではないかな。
- ・ 個別空調は各フロアでこまめに制御されることは少ない。快適な状態になっても空調が連続稼働されていることもある。自動 OFF の設定を定時後だけでなく、昼休みや 15:00 など追加するのがよいのではないかな。

(2) 快適性の視点

- ・ 夏期は、全フロアで暑めの傾向にある。
- ・ 冬期の午後の時間帯においては、やや暑いと感じる傾向にある。特に 4 階においては冬期にも関わらず暑さによる不快が生じている。自然換気システムにより冷たい空気を取り入れることで快適な温度に制御できるのではないかな。
- ・ 空調電力の消費量から、窓側エリアが外気の影響を受けやすいと考えられるが、BEMS センサ位置が通路よりであるため傾向が捉えられない。

上記の問題を解決するため、夏期および冬期における外調機の活用と、冬期における自然換気システムの活用について検討をすすめた。

3.5 追加分析

外調機および自然換気システムの効果を確認するため、G 本社棟 5 階南側エリアにおいて空調実験を行った。空調実験における設定変更内容を表 4 に示す。

表 4 空調実験項目

ケース	個別空調	外調機	自然換気システム
1	OFF	ON(送風のみ)	OFF
2	OFF	ON(送風のみ)	ON(13:00~16:00)
3	OFF	OFF	OFF
4	OFF	OFF	ON(13:00~15:00)
5	OFF	ON(暖房+加湿)	OFF
6	OFF	ON(暖房+加湿)	ON(13:00~15:00)

また、窓側と通路側の温湿度差異を確認するため簡易温湿度センサを設置することにした。簡易温湿度センサの設置位置について図 8 に示す。

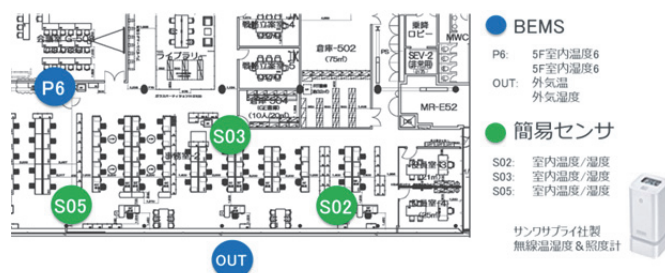
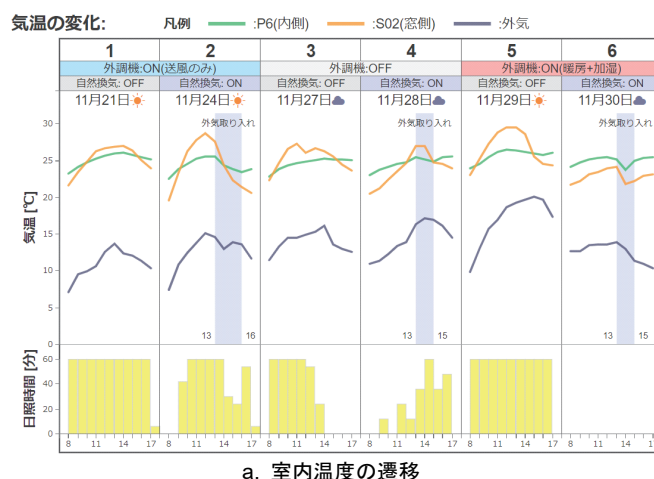


図 8 簡易温湿度センサ設置位置

窓側エリアの温湿度への影響因子として、天候および日照時間が考えられる。天候および日照時間のデータは、気象庁提供の過去データ検索サービスを活用し、厚木本社に最も近い、海老名観測所(海老名市中新田)のデータを使用した。

- (1) 空調実験期間における、室内温湿度および不快指数の遷移
実験期間中の通路側(内側)と窓側の温湿度および不快指数の遷移を図 9 に示す。

図 9a の室内温度遷移では、BEMS センサのある P6(内側)では室内温度および湿度は安定しているが、S02(窓側)では外気温および日照の影響を大きく受けることが読み取れる。特に日照時間の多い 11 月 21 日、24 日、27 日、29 日では室内温度の差が大きくなっている。フロアの快適性を測る場合は、現在の BEMS センサからのデータだけでは不十分であることがわかる。



a. 室内温度の遷移

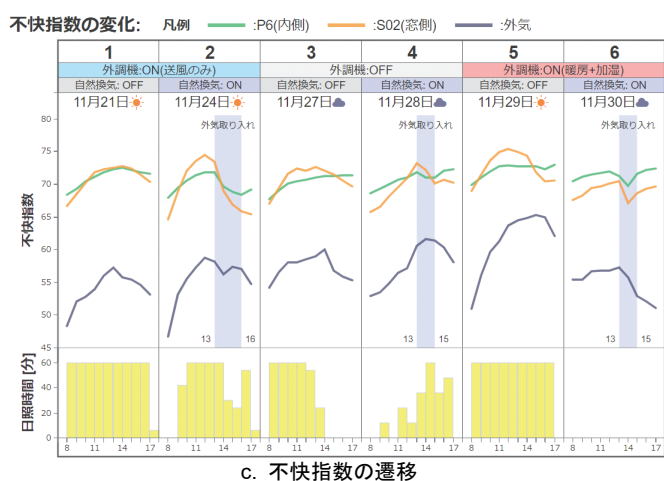
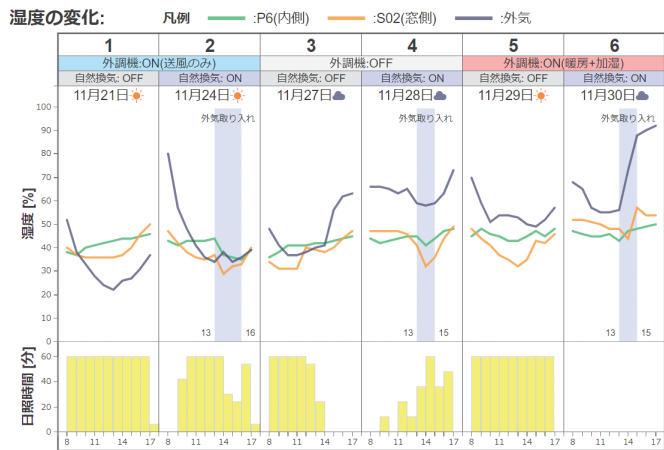


図9 実験期間中の温湿度および不快指数遷移

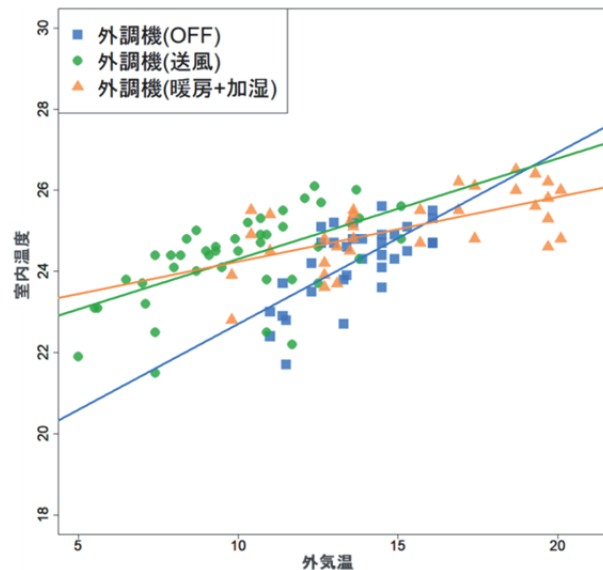
(2) 外調機の暖房効果の確認

外調機の暖房効果を確認するため、実験期間中の室内温度を目的変数、外気温を説明変数とした単回帰分析を行った。外調機の運転状態別に3つのケースで回帰式を求めた。図10に単回帰分析の結果を示す。

図10では、外気温と室内温度の散布図と、回帰分析によって得られた回帰直線をプロットしている。またそれぞれのケースについて、回帰直線の傾きと切片および決定係数の値を記載している。

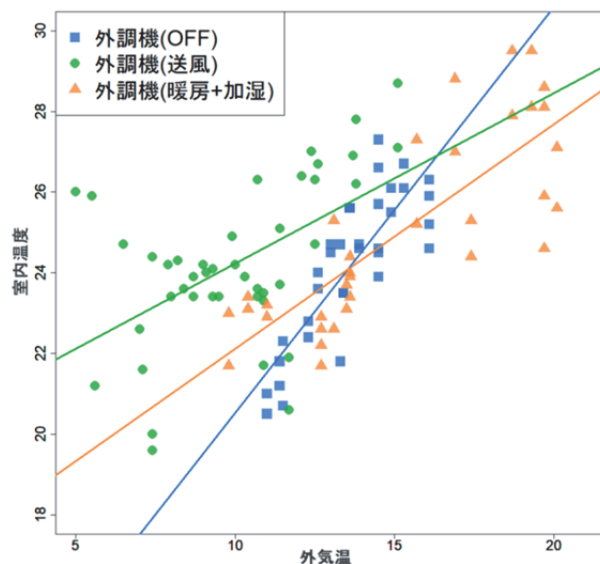
空調の効果が大きければ、室内温度と外気温の相関は低くなり、傾きが小さくなると考える。逆に空調の効果が十分でない場合は、室内温度は外気温との相関が高くなり、傾きが大きくなると考えられる。また回帰直線の確からしきについては決定係数で判断する。図10aをみると、P6(内側)においては、外調機OFFの場合でも傾きが0.4程度となっており、外気温の影響を受けにくい状態であることがわかる。外調機稼働するとさらに傾きが小さくなり、外気温の影響を

受けにくい状態となる。このことから、暖房+加湿運転の効果は十分にあると判断できる。



外調機	傾き	切片	決定係数
OFF	0.422	18.485	0.446
送風	0.247	21.837	0.319
暖房+加湿	0.159	22.659	0.373

a. 外気温と室内温度の相関[P6(内側)]



外調機	傾き	切片	決定係数
OFF	1.007	10.453	0.684
送風	0.422	20.014	0.258
暖房+加湿	0.556	16.569	0.645

b. 外気温と室内温度の相関[S02(窓側)]

図10 外気温と室内温度の相関分析

一方図 10b をみると、S02(窓側)において外調機 OFF の場合は傾きが約 1 となり、外気温の変化がダイレクトに室内温度に影響されることがわかる。外調機を稼働した場合の傾きは、送風のみで 0.4、暖房+加湿運転で 0.55 と、外調機 OFF の場合と比較して、外気温の影響は半減すると判断できる。窓側においても、外調機による暖房効果が確認できる結果となった。

(3) 自然換気システムによる室内温度の影響

自然換気システムの室内温度の影響について、各測定点での室温の時間推移を表 5 に示す。

表 5 自動換気システム稼働時の外気温および室内温度

	外調機	13:00	14:00	15:00	16:00	温度差	温度差/h
P6 (内側)	送風	25.6	24.4	23.8	23.4	2.2	0.73
	OFF	25.5	25.2	24.9	—	0.6	0.30
	暖房+加湿	25.2	23.7	25.0	—	0.2	0.10
S02 (窓側)	送風	27.6	24.4	22.3	21.4	6.2	2.07
	OFF	27.0	27.0	24.8	—	2.2	1.10
	暖房+加湿	24.1	21.8	22.2	—	1.9	0.95

表 5 において、自然換気システムによる外気取入れにて最も室内温度が下がったのは、外調機 ON(送風)のケースであった。窓側においては、1 時間に 2℃というペースで室内温度を緩やかに下げる効果が確認できた。次に効果があったのは外調機 OFF のケースであった。1 時間に約 1℃と緩やかな下がり方であるが、これは室内の空気が十分循環できていないことが原因と考えられる。まだ外調機が暖房設定されている際には、一旦温度は下がるが 2 時間後には上昇している。逆に言うと、外調機による暖房効果が十分機能していると言える。

上記結果より、冬期の昼間に窓側エリアにおいて「暑すぎる」という状態になった際に、自然換気システムの冷房効果があることが確認できた。

3.6 施策検討

データ見える化の結果および追加分析結果を元にディスカッションを行い、表 6 に示す空調運用改善施策を立案した。

表 6 空調運用改善施策

項目	季節	施策
外調機	夏	午前中の全体冷房の設定見直し (空調開始時刻の前倒し、温度設定の変更)
	冬	午前中の全体暖房の設定見直し (空調開始時刻の前倒し、2 階、6 階の設定温度を上げ、他のフロアの設定温度を下げる)
	夏・冬	深夜連続運転(連続稼働することで室内温度を一定にし、空調効率を高める)
個別空調	春・秋	一斉 OFF 運用の見直し 終業時 OFF 時刻の前倒し(18:00→17:00) 昼休みの一斉 OFF 運用
	冬	昼休みの一斉 OFF 運用
自然換気システムの運用	冬	計画的な自然換気システムの稼働 (晴天時の 13:00～14:00 に自動開放)

上記施策については、空調運用管理部门において、実施時期などを検討のうえ、実現に向けて取り組んでいくことになった。

4 空調運用改善施策の評価

4.1 評価対象施策

外調機の冬期施策である、運転時間変更および設定変更による電力削減を評価対象とした。

施策実施前後の設定変更内容を表 7 に示す。

表 7 外調機 基本設定変更内容

項目	2016 年度	2017 年度
設定温度	全フロア 20℃	2 階、6 階 26℃ 3～5 階 23℃
稼働開始時刻	7:30	6:30

* 上記設定は基本設定であり、必要に応じ設定を変更し運用している。

4.2 評価方法

前年度比較をする場合、一定期間の電力量の積算値で比較することが多いが、空調電力の場合、電力量は外気温の影響を大きく受けるため空調の消費電力抑制施策の検証には適さない。例えば今年度が厳冬で平均気温が下がれば、消費電力量もそれに依りて高くなる。施策の評価のためには気象条件など空調電力量に影響する因子が同じ条件の元で比較をするべきであると考え。

(1) 空調電力量の影響因子

空調電力量に影響する因子を特定し、その因子条件が同等とみなせる日の組み合わせを抽出し、空調使用電力を比較する。

影響因子の特定のために、空調使用電力量を目的変数とし、説明変数に外気温、室温、室温移動平均、室内湿度

とした重回帰分析を行った。空調電力量を最も説明できている説明変数の組み合わせの評価は、変数の選択数の違いを補正した自由度調整済み決定係数にて行った。自由度調整済み決定係数が最大となる説明変数の組み合わせを探索した結果を表 8 に示す。

表 8 説明変数の組み合わせ検討

変数	1	2	3	4
外気温	○	○	○	○*2
室温	○			
室温移動平均*1		○	○	○*2
室内湿度			○	
自由度調整済み決定係数	0.714	0.743	0.747	0.758

*1 室温移動平均は、現在時刻と 1 時間、2 時間前の平均

*2 交互作用項有効

上記結果より、外気温と室温の挙動が類似する日で比較することで、電力量の削減効果を正しく比較できることが期待できる。

(2) 比較対象日の選定

前項をふまえ、比較対象日の選定を行った。評価期間(2018 年 1 月 1 日～2018 年 2 月 28 日)、比較対象期間(2017 年 1 月 1 日～2017 年 2 月 28 日)の 0 時～17 時の外気温および室温データを用い、[外気温の差の二乗和+室温の差の二乗和]の値が小さくなる日の組み合わせを抽出した。抽出した日の組み合わせを表 9 に、比較対象となった日の外気温および室内温度の遷移について図 11 に示す。

表 9 抽出した比較対象日

No	検証年月日	比較年月日	比較用算出値*	検証側		比較側	
				外気温平均	室温平均	外気温平均	室温平均
1	2018/2/16	2017/2/2	7.09	5.7	23.7	5.7	23.4
2	2018/1/31	2017/1/25	22	4.1	22.7	4.1	23.0
3	2018/2/27	2017/1/31	25.5	7.4	23.4	7.4	23.4
4	2018/2/20	2017/2/7	28	7.1	23.4	7.1	23.3
5	2018/2/22	2017/1/20	28.8	3.7	23.5	3.7	23.2

* 外気温の差の 2 乗和+室温の差の 2 乗和(0 時～17 時)

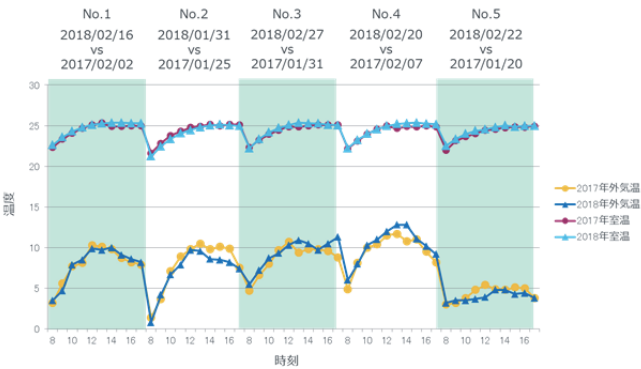


図 11 比較対象日の外気温と室温遷移

いずれの日の組み合わせについても、室温および外気温の遷移に差がなく、空調施策効果の比較条件を満たしていると判断できる。

4.3 評価結果

前項で抽出した比較対象日にて空調電力量を確認した。

空調設備ごとの使用電力量比較データを表 10 に示す。なお比較日のセッは最も外気温が低い状態であった No.5 を用いた。

表 10 空調使用電力比較表

項目	2016 年度 (2017/1/20)	2017 年度 (2018/2/22)	差分	増減率
チラー	860 kWh	900 kWh	40 kWh	4.7%
外調機	154 kWh	174 kWh	20 kWh	13.0%
個別空調	1,986 kWh	1,661 kWh	△325 kWh	△16.4%
空調電力計	3,000 kWh	2,735 kWh	△265 kWh	△8.8%
ピーク電力	335 kWh	295 kWh	△40 kWh	△11.9%

日単位の電力量の比較では、外調機の稼働時間を増やした分、チラーおよび外調機の電力は増えているが、個別空調の電力を抑制できており、空調電力全体で 8.8%の省電力化となっている。また課題であったピーク電力も 11.9%削減し、300 kWh 以下に抑制されている。

図 12 に、昨年度と本年度の空調電力消費量の時間遷移を示す。

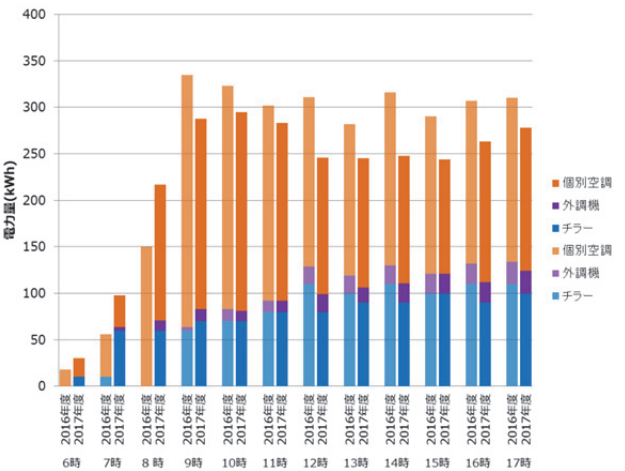


図 12 空調電力消費量の時間遷移比較

図 12 において、施策適用時は、6 時～8 時台では外調機の稼働を早めたためチラーおよび外調機の電力量は増えているが、9 時台以降は個別空調の電力量が抑制されていることがわかる。また昨年度は朝 9 時台に突出していた電力量のピークも、施策適用後はなだらかになっていることが見て取れる。

5 むすび

G 本社棟の空調運用の最適化という目的に対し、データ分析に基づく運用改善のプロセスを確立し、効果のある施策を立案することができた。冬期の空調運用の改善施策においては、ピーク電力を前年比で 11.9%削減することができた。

アンリツが目指す、設備全体の ZEB 化に向けては、継続的な改善とその効果の確認が必要である。今後は BEMS データ分析だけでなく、機械学習による空調運用の最適化など新たな手法を用いた施策立案にも取り組んでいきたい。

執筆者



秋山 智宏
技術本部
知識情報応用開発センター



原 綱義
アンリツエンジニアリング㈱
第二事業部
分析・情報システム部



武藤 文乃
アンリツエンジニアリング㈱
第二事業部
分析・情報システム部