

The first world championship in cybernetic building optimization

Abstract

建物を最適化する能力を競う選手権が2019年に開催された。33の参加チームのそれぞれに対してサイバー空間上に構築されたバーチャル建築が与えられた。延床面積10,000 m²のオフィスビルがサイバー空間上に多数建設され、参加チームのそれぞれに対して1棟ずつが与えられた。サイバービルディングはBACnet通信で制御することが可能であり、競技参加者達はオンラインでサイバービルディングの設備システムのチューニングを行い、運用技能を競った。最適化の能力はエネルギー消費と熱的快適性の両面から評価され、成績はリアルタイムにWEBで公開された。2ヶ月の競技期間中に全部で339回の様々な運用が試された。トップのチームは最終的にエネルギー消費量を12.1%減らし、不満足者数を21.0%減らすことに成功した。この論文では、この選手権のルールとスケジュールの検討と、参加者たちのスコアの分析結果について報告する。

1. Introduction

建物に関わるエネルギー消費は、全世界の総エネルギー消費量の約40%を占めるという (International Energy Agency 2008)。

建物が生涯に費やすエネルギーは、建設段階のものと同運用段階のものに分けられ、多くは運用段階に生じる。近年では十分な初期投資によってエネルギー性能を高めた建築の事例も増加しており、建設段階のエネルギー消費の比率は高まる傾向にある (Mohammed 2013)。しかし、従来の建築と省エネルギー建築とでライフサイクルのエネルギー消費を比較した Sartori のレビュー論文 (2007) や Chau (2015) の研究によれば、省エネルギー建築であったとしてもライフサイクルエネルギーの50%以上は運用段階で費やされると言う。従って、どのように建築設備をどのように制御して運用するかという問題は、今日においても十分に検討すべきである。

通常、建物が運用時にどれだけのエネルギーを消費するかを予測するためには、計算機を用いたシステムシミュレーションが用いられる。建物は、非線形な挙動を示す要素を非常に多く持つ複雑なシステムであるために、手計算で予測することが難しいからである。

一般的な建築環境システムのシミュレーションは、特定の計算条件に対するエネルギー消費を予測し、これらの条件設定は変更することができる。これらは例えば、1; 壁や断熱の材料と厚み、機械の効率、2; 制御パラメータ、3; 外気状態である。1つ目は建設段階で変更可能な条件、2つ目は運用段階で変更可能な条件、3つ目は人間には変更できない条件である。

この逆問題を解けば、運用段階のエネルギー消費を最小化する条件 (ハードウェアの仕様や制御パラメータ) を推定できる可能性がある。逆問題とは、 $y = f[x_i (i=1, 2, \dots, n)]$ で表現されるモデルに関して、観測値 y が望ましい値となるような、原因 (causal factors) x_i を推定する問題である (Zhang et al. 2015, Rouchier 2018)。建築エネルギーシミュレーションでは、 y がエネルギー消費量、 x_i がハードウェア仕様や制御パラメータとなる。

しかし逆問題を応用したエネルギーの最小化が有効になるためには、現実の建物のエネルギー消費をシミュレーションが正確に予測できなければならない。現実には両者は必ずしも一致しないという問題が指摘されており、この乖離は Performance Gap と呼ばれる (Wilde 2014)。

このような乖離が生じる具体的な原因としては、例えば以下が挙げられる。1; シミュレーションモデルは現実の全てを完全に数式化せず、ある程度の抽象化が行われているために限界がある。2; コンポーネントの接続やパラメータの設定は、通常は人間が行う作業であるため、その巧拙により計算結果は異なる。不適切な入力からは無意味な結果しか生まれず、これは「Garbage In Garbage Out」の法則と呼ばれる。3; 現実の建物は、シミュレーションの想定とは異なるスケジュールで使われる。4; 現実の建物では、シミュレーションモデルが仮定した理想的な制御が実現していない (Khoury 2017)。これらは Limitations of energy modelling という論点であり、いくつかは CIBSE 2015 で詳細に議論されている。Performance Gap を無くすためには、これらの原因を解決しなければならない。

本研究は、上で最後に挙げた、理想的制御を仮定することによる乖離を解消することを狙っている。理想的制御という仮定を設ける理由は、すべての制御機構をモデル化するとモデルのパラメータ設定の手間が大きく、計算時間も大きく増大してしまうためである。しかし一方で、現実の建物では自動的にこのような理想的な制御が実現できるわけではないために、計算結果と現実の間に乖離が生じる。2つの具体的な事例を以下に示す。

最初の例は熱源モデルの時間遅れである。シミュレーションで用いられる熱源モデルの多くは静的モデルであり、冷水や温水が必要であれば、瞬間的に供給することができると仮定されている。このようなモデルを用いる場合には、現実の建物とは異なり、熱源が設定温度の水を供給するまでに必要となる時間を推測し、適切な起動時刻を検討する必要はない。いくつかの現実の建物では、冷房や暖房ができないリスクを回避するために、必要であるよりもかなり早く熱源を起動することがあり、エネルギーはシミュレーションよりも多消費になる。

もう1つの例は、水量や風量の計算方法である。多くのモデルでは回路網モデルを使わず、水量や風量は、各機器が必要とする値に調節できるということが仮定される。従って、バルブやダンパの制御が上手いか下手かはモデルで表現されない。これらの制御不良はポンプのエネルギー消費に影響を与えるだけではなく、熱の過剰供給でエネルギー消費を増やしたり、熱の供給不足で環境を悪化させたりする。

上で説明した乖離を縮めるためには2つの方法がある。1つの方法は設備のチューニングを十分に行い、現実の建物の制御不良を無くし、理想的な状態に近づけることである。もう1つの方法は、制御の不良をシミュレーションモデルで表現することである。

しかし現在、我々は技術者のチューニングの能力を定量的に評価することができていないため、これらの2つの方法はいずれも採用することが難しい。1つ目の方法を採用するためには、チューニングの能力の高い多数の技術者を教育して配備する必要がある。しかし、能力の定量化ができなければ、教育の内容や水準を定めることができない。2つ目の方法を採用するためには、技術者の能力不足によって制御が不良になるリスクを数式化する必要がある。しかし、このリスクは技術者の能力のばらつきが定量的に観測できなければ表現できない。

チューニングの能力を定量的に評価することが難しい原因は、建物が一品生産品であり、heterogeneousであることにある。ハードウェアが異なれば、エネルギー消費は異なるため、複数の異なる建物のエネルギー消費の違いを単純に比較しても、制御をチューニングした技術者の能力の違いを知ることはできない。

純粹にチューニングの能力を比較するためには、建物のエネルギー消費に影響を与える様々な条件を全く同一に揃えるべきであるが、現実にはこのような条件を用意することは不可能であろう。

現実には不可能であれば、代替案はシミュレーションモデルを用いることである。シミュレーションモデルであれば、全く同一条件の建物を無数に容易に複製することができる。もちろん、ここで用いるシミュレーションモデルでは先に述べたような理想的な制御は仮定しない。先の例に即して言えば、熱源の熱容量と時間遅れを数式化し、配管やダクトの回路網を解き、これらを制御するパラメータはユーザーが自由に設定できるようにしたモデルである。

このような目的に対しても使うことのできる、リアリティの高いシミュレーションモデルは、一般にはエミュレータと呼ばれる。建築設備分野でのエミュレータの活用は、1990年代にIEA Annex17 (Lebrun 1993, Vaezi-Nejad 1991, IEA 1997)で検討されたことが始まりである。その後、IEA Annex 25でフォルト検知への応用が検討され、最近ではBushby (2001; 2010)が空調と火災を合わせた総合エミュレータ(VCBT: Virtual Cybernetic Building Testbed)を開発している。筆者らも設備のチューニング能力を評価するためのエミュレータシステムを開発しており (Togashi and Miyata 2019)、エネルギー消費量だけではなく執務者の温冷感も予測することができる。

そこで筆者らは、このエミュレータシステムを使うことでチューニングの能力を定量的に評価することを目的に、能力を競う選手権を開催した。競争を通じて、新たな運用技術の開発を促し、参加者たちの運用技能の向上を図ることやチューニングの能力によって生じる建物性能のばらつきを定量的に捉えることも目的である。本報では、この選手権のルール、スケジュール、参加者の属性、開催結果について報告する。

2. Past reference cases of the competition

競争を通じて、建築設備分野の技術の発達を促そうという試みは、過去にいくつか存在する。これらの先行事例は、今回の選手権の仕組みを検討するために参考になる。

1) The Great Energy Predictor Shootout

ASHRAE が 1990 年に行ったエネルギー予測コンペは最もよく知られた事例である。この詳細に関しては Kreider et al. (1994) が詳細に報告を行っている。

その頃には、例えばニューラルネットワークの誤差逆伝播法 (Rumelhart 1986) など、時間遅れを持つ非線形システムの予測問題に対して様々な新手法が開発されていた。そこで、競争を通じてそれらの予測手法の相互比較を行うとともに、関連する他分野の知見を建築分野へ導入することを目的に企画されたコンテストが The Great Energy Predictor Shootout I である。

コンテストで用いられたデータは、テキサス州の大学施設（延床面積 約 30,000 m²）で収集された 6 ヶ月間の建物運用データである。ただし、建物の詳細な情報は競技が終了するまで、参加者には公開されなかった。6 ヶ月間のデータは 1989 年 9 月から 12 月末の 4 ヶ月間と、1990 年 1 月から 2 月末までの 2 ヶ月間に分割され、前者は予測モデルを構築するための訓練データとされ、後者は未知の入力に対する予測性能を評価するための試験データとされた。予測対象のデータ項目（以下、予測データ）は、建物の電力消費量、冷水負荷、温水負荷であり、予測のために用いることのできるデータ項目（以下、入力データ）は、外気条件（乾球温度、絶対湿度、風速、水平面全天日射量）であった。訓練データは、入力データと予測データの組で提供され、試験データは入力データのみが提供された。

合計で 150 チームが参加のために訓練データを入手したが、最後まで競技を行った数は 21 チームであった。テストデータは 1990 年 1 月 1 日から 2 月 28 日にかけて順次提供された。訓練データにはクリスマス休暇と年末年始のデータが含まれており、同期間のエネルギー消費は、通常よりも低い値であった。また、厳寒期に配管凍結と破断による異常データが含まれていたが、これらの詳細は参加者には知らされず、異常データをどのように扱うかは各参加者に委ねられた。

予測値の性能は Eq. 1 で示される変動係数で評価された。ここで、 $y_{data,i}$, $y_{pred,i}$, y_{data} , n はそれぞれ、独立変数の組に対する従属変数の組の値、従属変数の予測値、従属変数の平均値、テストデータの数、である。

$$CV = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{pred,i} - y_{data,i})^2}}{n \cdot \bar{y}_{data}} \quad \text{Eq. 1}$$

本コンテストに関しては、Kreider et al. (1994) による全体の結果報告の他にも、参加者の多くが個別に各自の予測手法について報告を行っている (Feuston et al. 1994; Iijima et al. 1994; Kawashima 1994; MacKay et al. 1994; Ohlsson et al. 1994; Stevenson 1994)。

2) The Great Energy Predictor Shootout II

The Great Energy Predictor Shootout の成功を受け、第 2 回のコンテストが 1994 年に開催された (Haberl et al. 1996)。本コンテストでは第 1 回で計算対象となった大学施設に加えて、新たに延床面積 約 14,000 m² の大学施設も計算対象となった。FTP サーバーに訓練データを配置することで、任意の者が参加に必要なデータを入手できる方式とした。しかし、第 1 回に比較すると参加者は減少し、50 名が FTP サーバーの詳細が記載された「readme.txt」を読み、11 名が計算用データをダウンロードし、4 チームが実際に競技を行った。第 2 回のコンテストの新たな試みは、建物の省エネ改修効果を評価することに使われたことにある。参加者にはまず、省エネ改修前の両建物の訓練データと試験データが配布され、第 1 回のコンテストと同様にモデルのエネルギー予測性能が競われた。さらに、省エネ改修後の運転データが提供されることで、省エネ改修を行わなかった場合のエネルギー消費が予測され、これと実績値との差から省エネ改修の効果が試算された。

第 2 回のコンテストに関しても、各参加者が個別に各自の予測手法について報告を行っている (Chonan et al.

1996; Jang et al. 1996; Katipamula 1996; Dodier and Henze 1996)。

3) Heat Load Prediction Public Competition

熱負荷予測公開ベンチマークは、空気調和・衛生工学会で 1995~1998 年度に組織された蓄熱最適化委員会の活動の一環として行われたものである (SHASE 1998)。蓄熱式空調システムの熱源運転最適化を行うためには翌日の空調負荷予測が必要となるが、様々な予測手法が提案されていたため、同委員会ではその相互比較を行うために公開ベンチマークテストを開催した。

ベンチマークテストは 1998 年の 8 月と 10 月に開催され、前者をトライアル I、後者をトライアル II と呼ぶ。いずれも翌日の空調熱負荷の予測を目的としているが、トライアル I では現実には得ることのできない、翌日の気象条件、室内温湿度条件、運転時間が与えられる一方で、トライアル II では現実と同様に翌日の情報としては天気予報と空調運転スケジュールしか与えられない。

トライアル I の参加チーム数は 18、トライアル II の参加チーム数は 14 であった。トライアル I は予測結果などのやり取りに e-mail を用いた。主催者側が 1 日分の予測用入力データを参加チームに eMail で送信し、これをもとに参加者が予測を行って予測結果を主催者側に返信する。返信が確認された後に主催者側は翌日の 1 日分の予測用入力データを送る、という手順である。しかし、この手法はかなり煩雑であり、厳密には参加者同士での情報連携というルール違反を防ぐことはできない。従ってトライアル II では参加者の良心に期待して、最初から正解とともに入出力データを提供するという方式に変更している。トライアルの I とトライアル II の両方において、予測モデルの性能は Eq. 2 で示す誤差自乗和 (SSD: sum of squared differences) で評価された。

これらの選手権で用いられた熱負荷予測手法に関しては、参加者たちがそれぞれ内容を報告している。選手権者は建築設備を専門とはしていない情報工学の研究者であった。従って、この選手権は異分野からの技術の導入に成功したと言える。

$$SSD = \sum_{i=1}^n (y_{pred,i} - y_{data,i})^2 \quad \text{Eq. 2}$$

4) Championship policies based on precedents

先行する事例はいずれも 1990 年代に実施されたものである。一部で FTP サーバーや email は用いられていたが、多くの事務作業は手作業で行われていた。SHASE の熱負荷予測コンペでは、成績に関して参加者と e-mail をやり取りする作業が負担となって、トライアル II では成績評価のシステムを変更している。参加者を増やして選手権の規模を拡大するためには、事務的な作業をできる限り自動化するシステムを構築する必要がある。特に本選手権は、先行事例とは異なり、単純に正解 (熱負荷やエネルギー) と比較するだけではなく、成績評価のためにはシミュレーションを実行する必要があるため、この自動化は必須である。

先行事例では、多くの参加者が自分達の計算方法について報告を行っていた。勝ち負けの情報だけではなく、どのような手法を用いることでどのような成績を得られたのかという関係性を知ることは、本分野の今後の発展に有益である。本選手権でも参加者たちが計算方法を開示することが望ましいが、これらは参加者自身が決めることであるため、主催者側が強制することはできない。そこで、各参加者が最高の成績を獲得した際の運転データを保存しておき、これらを公開する方針とした。これらのデータを分析すれば、各参加者の運用方法の概要を知ることができる。

一般的に、運転データには異常値が含まれることが多い。計測に問題がある場合や、機械が故障している場合もある。また、機械が正常に動いていても、経年劣化によって少しずつ計測値がずれていく場合もある。事実、The Great Energy Predictor Shootout I で配布したデータには、長期休暇による異常値と配管損傷による異常値が含まれていた。このような異常値にどのように対処するかは運用の能力による。このため、当初は、あえて異常値を混入させることで、耐性を試験することも考えたが、最初の大会としては問題が難しくなりすぎるため、とりやめた。今後、選手権の難易度を高める場合には、導入を検討すべきであろう。

The Great Energy Predictor Shootout で二回目に参加者数が減少した一つの理由は、省エネ改修効果の予想が主題

になったためであろう。これは価値のあるテーマではあるが、参加者たちの勝ち負けをはっきりとさせることはできない。参加者を増やすためには、勝敗を明確にしてゲームとしての楽しさを向上させなければならない。このため、本選手権では、開催前にスコアの計算方法を明示し、チャンピオンシップの期間中、参加者たちのスコアをリアルタイムで表示することにした。

本選手権は、過去の例に比較すると問題が複雑であるという点は意識しなければならない。本選手権の目的は、熱負荷やエネルギーなどの単一の数値を予想することではなく、数千の制御パラメータを調整してエネルギーと快適性を改善することである。情報分野からの参加者の多くは、建築設備システムの物理的な仕組みの詳細は知らないと予想される。一方、建築分野からの参加者の多くは、BACnet で通信するためのプログラムに関しては経験が無いだろう。このため、単純な「readme」ファイルでは、参加のための情報として不十分であり、BACnet 通信のプログラムの書き方や、運用改善のチュートリアルを記載した、詳細なマニュアルが必要である。

3. Preparation of “World championship of cybernetic building optimization”

本節では、選手権のルール（性能評価方法と開催スケジュール）と、参加者の情報について解説する。

1) Determination of evaluation criteria

既に述べたように、本選手権では既報で解説したエミュレータシステムを使用して競争を行う。エミュレータシステムは、標準的な運用を行った場合と比較して、エネルギー性能と快適性がどのように変化するのかを算出することができる。これらの性能は Eq. 3 で示されるエネルギー削減率（ERR）と Eq. 4 で表される不満足者の低減率（DRR）で評価される。ただし、 E は一次エネルギー消費量、 D は不満足者率、添字の r はデフォルトの運用、添字の opt は改善した運用を表す。エミュレータで使用される熱負荷計算モデルと静的機器モデルは、それぞれ BESTEST (Togashi and Tanabe 2009) および SHASE ガイドライン (Ono, Ito, および Yoshida 2017; SHASE 2016) によって検証されている。個別の設備機器の物理モデルや執務者の温冷感などの詳細な計算方法に関しては既報を参照してもらいたい。

$$ERR = \frac{E_r - E_{opt}}{E_r}, \quad \text{Eq. 3}$$

$$DRR = \frac{D_r - D_{opt}}{D_r}. \quad \text{Eq. 4}$$

選手権者を決定するためには、これらの 2 つの指標（省エネルギー性と熱的快適性）を統合する必要がある。このような複数の性能指標を組み合わせた最適点を探索する問題を multi-objective optimization problem と呼ぶ。Nguyen (2014)によれば、建築設備分野の最適化の研究の 4 割程度が multi-objective optimization problem を対象としている。複数の指標を組み合わせる場合の、もっとも単純な方法は Eq. 5 で示される線形結合である。ただし w_{ERR} は 0 から 1 の範囲の値を持つ重み係数である。

$$w_{ERR}ERR + (1 - w_{ERR})DRR. \quad \text{Eq. 5}$$

Eq. 5 の重み係数が偏っている場合には問題が生じる可能性があり、以下にその説明を行う。Fig. 1 は異なる重み係数を持つ 2 つの線形結合関数の等高線である。一点鎖線は重み係数が小さい場合、点線は重み係数が大きい場合である。実線の曲線は運用を変えることで実現し得るパレートフロントである。エネルギー削減と不満足者の低減はトレードオフの関係にあるため、右下がりの傾向になる。また、一単位の追加的なエネルギーの使用によって低減できる不満足者の量は逓減するため、右上に凸形状になる。それぞれの線形結合関数で最も高い点数となる組み合わせをパレートフロントから選択すると(A)と(B)が得られる。図から明らかなように、重み係数を変えると最適解が大きく変化する。非常に偏った重み係数を用いた場合には、エネルギー消費または不満足者数が増加する点が最適解になる可能性すらある。

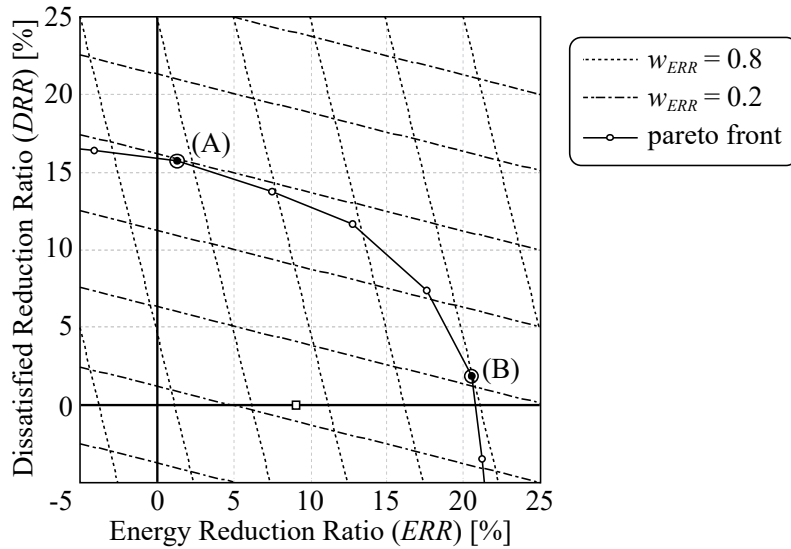


Fig. 1 Example of pareto optimum solution selected by linear combination function

このように極端に偏っている運用に高いスコアが与えられるのを避けるため、本研究では総合成績を Eq. 6 で計算することにした。この指標を Effective Energy Reduction Ratio (E2R2) と名付けた。この式には非常に保守的な態度が示されている。ERR と DRR を x 軸と y 軸にとると、総合成績の等高線は Fig. 2 のようになる。グラフの第 2 象限と第 4 象限では成績は 0 である。これらは、快適性が省エネルギー性かのいずれかを無視する運用である。E2R2 の等高線は、Fig. 2 に示すように $ERR=DRR$ で表される線を持つ形状である。線形重み付け関数とは異なり、どちらかの指標が 0 に近づくと E2R2 も 0 に近づくため、一方の指標を軽視した運用を行うと、評価が大きく下がる。Fig. 3 は E2R2 を評価関数にした場合のパレート最適解の選択例である。最適解は(C)であり、図から明らかなように、この選手権では省エネルギー性と快適性の両方をバランス良く改善できたものが選手権者になりやすいことになる。

$$E2R2 = \begin{cases} ERR \cdot DRR & (0 < ERR \cap 0 < DRR) \\ 0 & (other) \end{cases} \quad Eq. 6$$

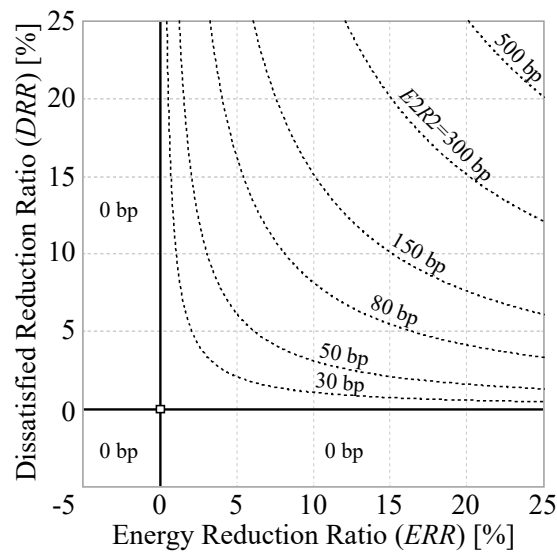


Fig. 2 Contour lines of the modified Effective Energy Reduction Ratio (E2R2) function

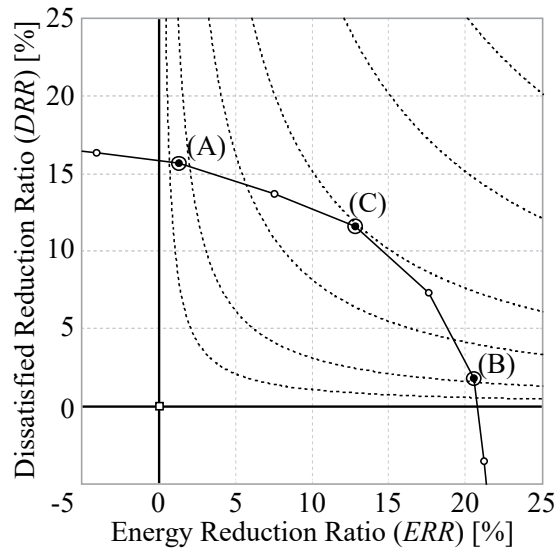


Fig. 3 Pareto optimal solution with Effective Energy Reduction Ratio (E2R2) function

2) Determination of schedule

我々は既報で、BACnet 通信を使ってオンラインでエミュレータを遠隔操作するためのシステムを構築した。しかし、このような選手権は先例がなく、初回の大会から参加方法をオンライン制御のみに絞ると、参加者が減少し、データが十分に取得できない危険性があった。そこで選手権の期間を半分に分け、前半の一月をオフライン部門、後半の一月をオンライン部門とした。

オフライン部門もオンライン部門も、サーバーに設置したエミュレータに対して操作を行うという点では同じである。後者は BACnet 通信が許可されているという点だけが異なる。選手権参加者のスコアはリアルタイムで全参加者に公開される。リアルタイムでの成績開示の仕組みを Fig. 4 に示す。

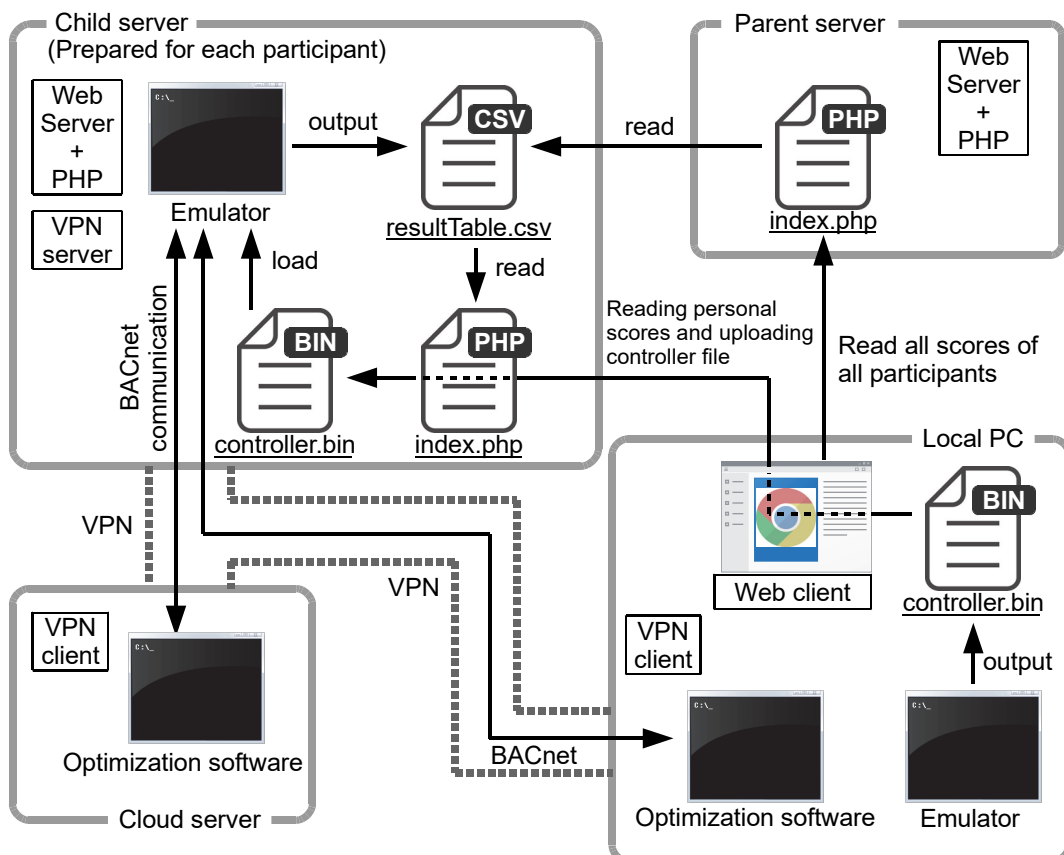


Fig. 4 Real-time score evaluation system

すべての参加者には別個のサーバー (child server) が与えられる。サーバーではエミュレータが常時起動しており、1年間分の計算が完了すると計算結果 (resultTable.csv) が書き出される。これらの計算結果は、Web サーバー (parent server) で収集され、公開される。

参加者がサーバーでエミュレータの計算を開始させるためには、エミュレータの制御方法 (設定値や運転スケジュール) が記録された制御ファイルをアップロードする。ローカル PC でエミュレータを起動して設定値を操作すれば、自動的に制御ファイルが生成される。このようなバッチ方式の制御方法は伝統的なエネルギーシミュレーションと似ているため参加者にも理解しやすい。しかし、例えばエミュレータ内部の室温や執務者行動などを利用した独自のフィードバック制御はできない。このような制御を行うためには、サーバー側エミュレータと直接にオンライン接続する必要があり、選手権後半のオンライン部門ではこれが許可される。

オンライン部門では VPN サーバーが起動するため、エミュレータ側サーバーに VPN で接続できるようになる。そして、この VPN を使用してエミュレータとの BACnet 通信を行うことができる。参加者はエミュレータを自由に制御するための独自の最適化ソフトウェアを作成して実行できる。このソフトウェアはローカル PC で走らせても良いし、ネットワークが安定しているクラウドサーバーで走らせても良い。

サーバー側エミュレータの実行速度は、実時間の約 1,000 倍まで加速させることが可能で、参加者が自由に設定できる。この加速度設定値自体が BACnet 通信で制御できる値である。オフライン部門では常に最大加速度としておけば良いが、オンライン部門ではこの加速度の値は重要である。遅すぎれば運用改善を実行する回数が少なくなってしまう。逆に、速すぎれば独自の制御プログラムの計算が追いつかなかったり、通信が間に合わなかつたりする。つまり、軽快に動作する優秀な最適化ソフトウェアを作ることができれば、運用試行回数を安定的に増やすことができる。通信の安定性や計算速度を含めた、このような観点からの評価は、最適化ソフトウェアを現実の建物に適用する際に、非常に重要となる。

多くの参加者にとって、BACnet による制御プログラムの開発は経験が無いことが予想された。このため、JavaScript (node.js), C#, Basic, C++, Python 言語により、BACnet 通信で PMV 一定制御やブラインドのスラット角制御を行うサンプルプログラムを配布した。

3) Information of participants

Table 1 に参加者一覧を示す。期日までに 34 のチームが参加を表明したが、1 チームが取りやめたため、33 チームでの競争となった。建物の運用について関心がある、大学の研究室、企業の研究機関、設計者、施工者、管理者などが参加した。「Other」の中には情報分野の研究者もいた。

選手権の初日には、エミュレータソフトウェアの具体的な使い方を教えるための説明会を開催した。参加は自由であり、33 チーム中、24 チームが参加し、人数の総数は 66 名であった。Fig. 5 に説明会の風景を示す。説明会の参加者達には Fig. 6 と Fig. 7 に示すソフトウェアが配布され、これらのソフトウェアを使ってチュートリアルが行われた。Fig. 6 はエミュレータの計算状況をリアルタイムで表示するソフトウェアであり、Fig. 7 は Microsoft Excel から制御信号を送るためのソフトウェアである。どちらのソフトウェアも BACnet でエミュレータと通信する。既に述べたように、参加者たちは BACnet を使って自由に自分のソフトウェアを開発しても良かったが、結果的にはほとんどの参加者がこれらのソフトウェアを使って最適化を行った。これらのソフトウェアは、説明会に参加しなかったチームに対しても配布された。

Table 1 Participants' affiliations and job categories

No.	Affiliation	Job category	No.	Affiliation	Job category
01	Satoh Energy Research	Research	18	Tokyo Denki University	Education institution
02	Hokkaido University	Education institution	19	Anonymous	Building constructor
03	Nihon Sekkei	Building designer	20	Kanden Facilities	Building manager
04	Nagoya City University	Education institution	21	Anonymous	Other
05	Chiba University, Hayashi lab.	Education institution	22	Anonymous	Building designer
06	Kajima Technical Research Institute	Research	23	Anonymous	Building constructor
07	Ritsumeikan University	Education institution	24	Kogakuin University	Education institution
08	Waseda University, Tanabe lab.	Education institution	25	Anonymous	Building Design
09	Tokyo Polytechnic University	Education institution	26	The University of Electro-Communications, Sato lab.	Education institution
10	Sony CSL and Daiwa House Industry	Research	27	Anonymous	Other
11	(Canceled)	(Canceled)	28	Kansai Electric Power	Research
12	Kyushu University, Sumiyoshi lab.	Education institution	29	The OpenCAE Society of Japan	Other
13	Shibaura Institute of Technology	Education institution	30	Anonymous	Other
14	Anonymous	Building constructor	31	Anonymous	Research
15	Sanko Air Conditioning	Building constructor	32	Tokyo City University	Education institution
16	Anonymous	Other	33	Kansai Electric Power	Other
17	Kanden Energy Solution	Building manager	34	Anonymous	Research



Fig. 5 Scene from the briefing conducted on the first day of the Championship

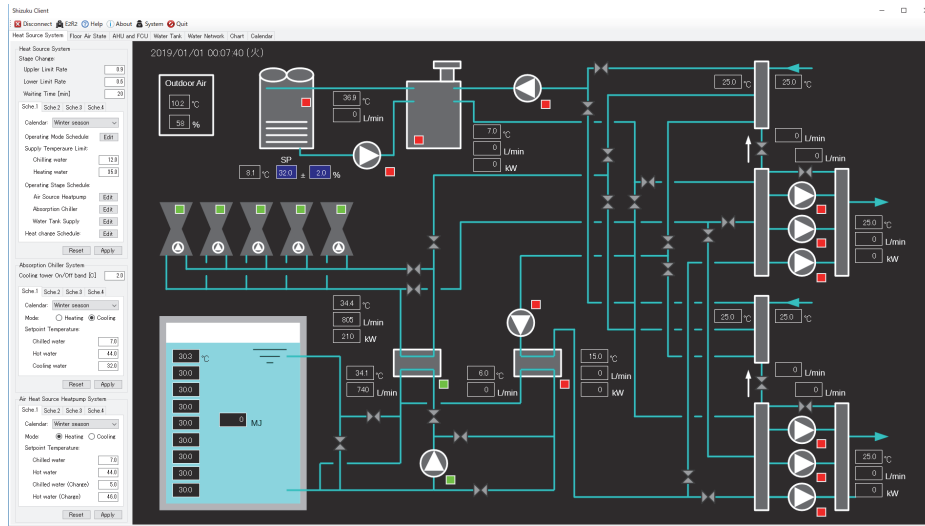


Fig. 6 Emulator information display software

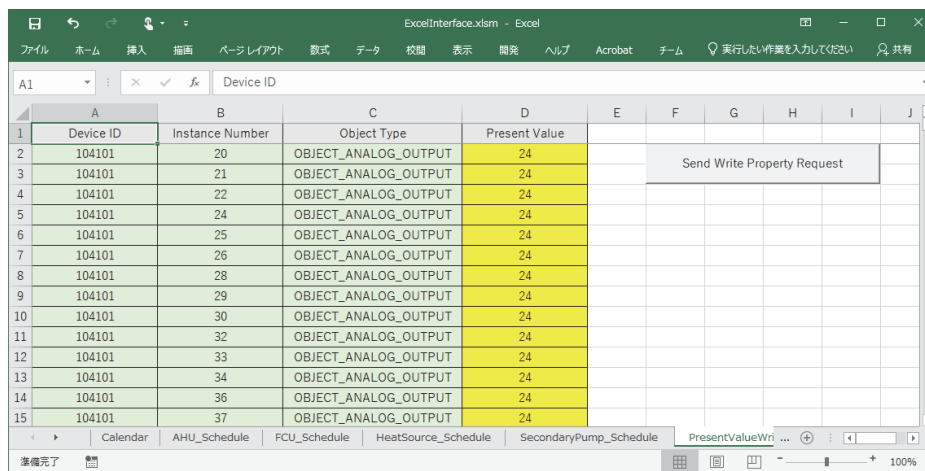


Fig. 7 Emulator control software

4. Result of “World championship of cybernetic building optimization”

1) Relationship between the number of calculations and scores

2ヶ月間の競技期間中のチーム別の計算試行回数を Fig. 8 に示す。サーバー側では全部で 339 回の計算が行われ、平均的には 10.3 回/チームであった。最大は 53 回で、これはほぼ毎日計算を行うような水準である。

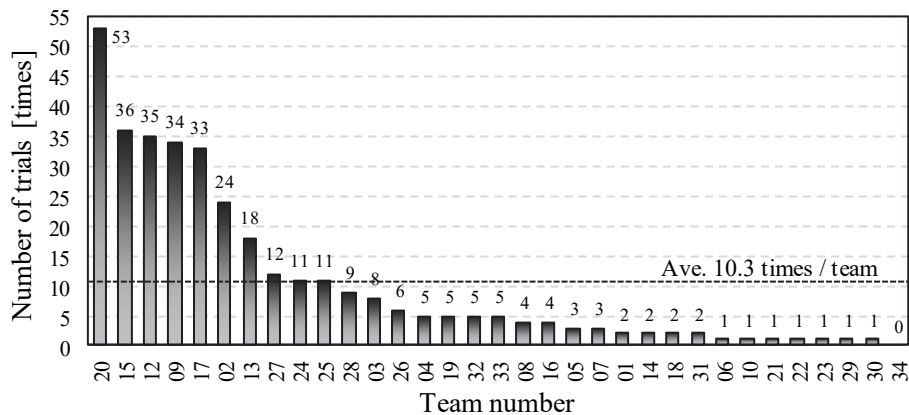


Fig. 8 Number of calculation trials per team (descending order)

各チームの試行回数と最終的な E2R2（総合成績）との関係を図 5 に示す。多くの検討を重ねたチームほど、最終成績が高い。また、選手権終了後に成績上位者にヒアリングを行った結果、上位の 4 チームはいずれもローカル PC で 50 回以上の検討を行っていたことがわかった。

建物の運用性能の向上は、天才的なひらめきによってではなく、漸進的な試行錯誤によっても実現することが示唆される。一方で、成績の上昇率は計算回数を増すほどに低下していくこともわかる。検討を重ねることで効果的な運用改善の方策が減っていくためであろう。

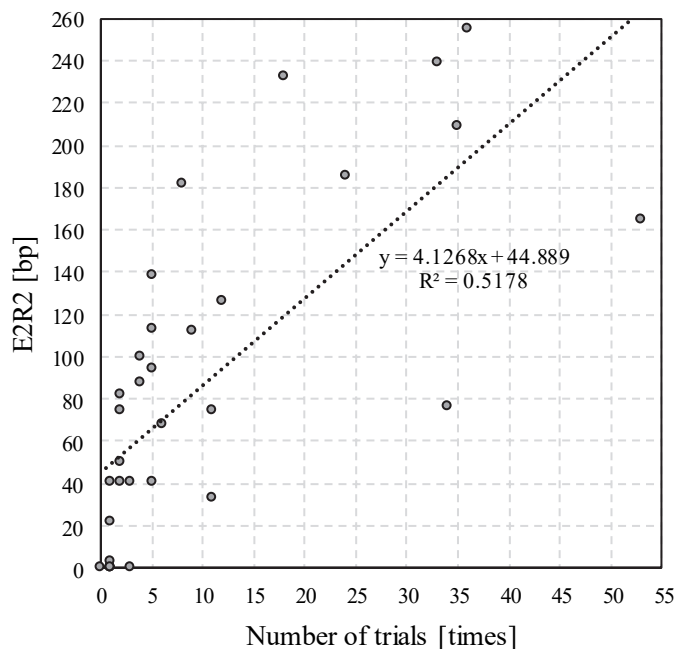


Fig. 9 Relationship between the number of trials conducted and the final E2R2 of each team

2) Score changes and final results

競技開始後、1 ヶ月間の得点の分布の推移を 1 週間毎に Fig. 10 に示す。日数の経過とともに得点が増加していくことが確認できる。初期は ERR（省エネルギー性）と DRR（快適性）を同程度に上げる運用が試行されていた。後に、DRR を重視する運用が多くなり、ERR が 10%程度、DRR が 20%程度の運転点が重点的に探索されるようになった。高スコアを獲得したチームの多くはこの運転点のまわりで運用を行った。

オンライン部門終了後の最終的な得点分布を Fig. 11 に示す。エネルギー性能をやや重視した運用が検討され、15%程度まではエネルギー削減が可能であることが確認された。しかし、エネルギーの削減に起因する快適性の下落幅が大きく、両立が難しいため、総合成績の最大値はオフライン部門と同じ点となった。

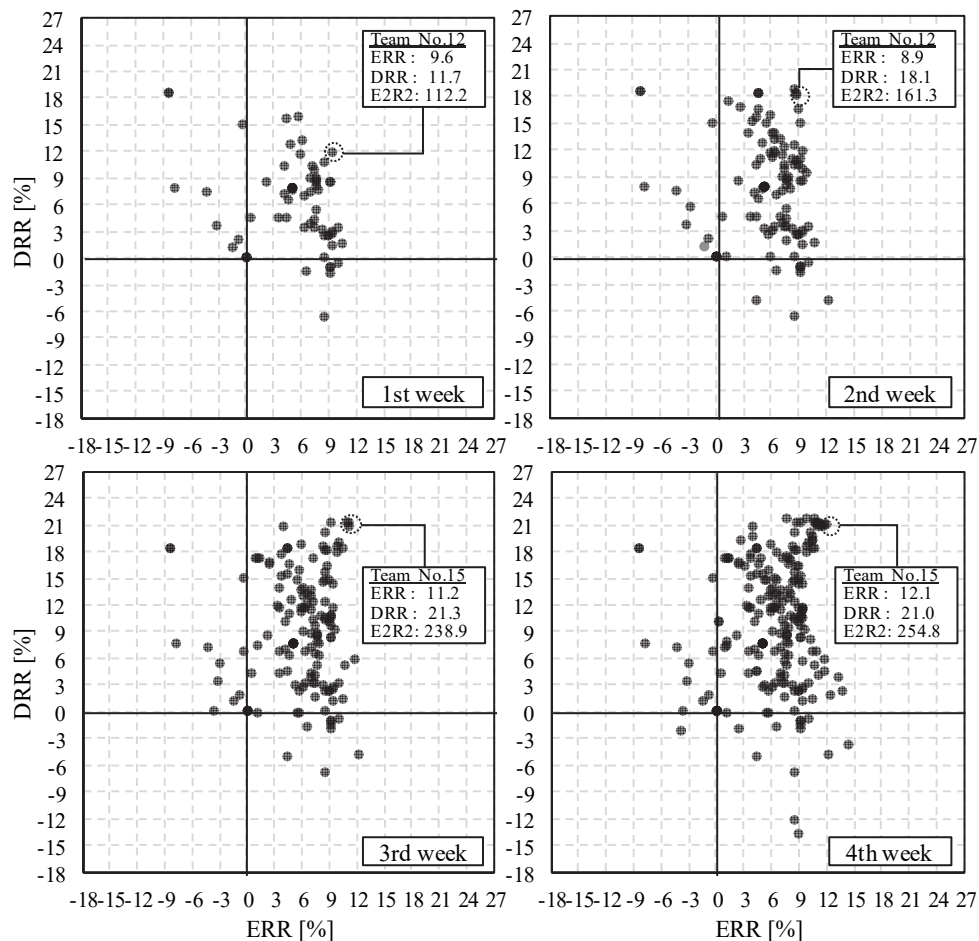


Fig. 10 Transition of score distribution (offline period)

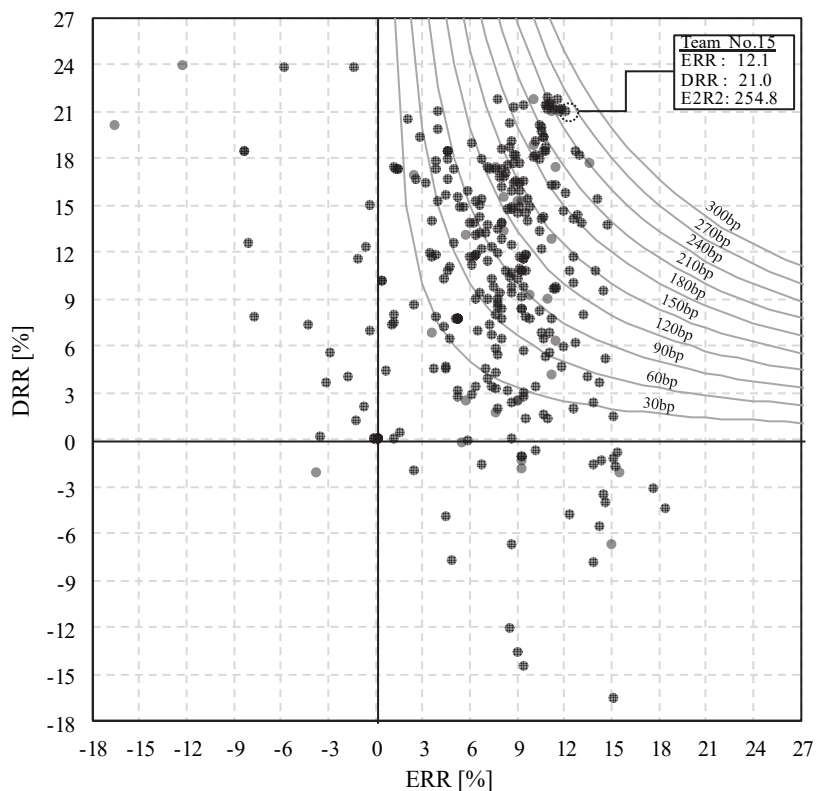


Fig. 11 Final score distribution

チーム別の ERR (省エネルギー性)、DRR (快適性)、E2R2 (総合成績) の推移を Fig. 12~Fig. 14 に示す。x 軸

は日付であり、選手権の開始日から終了日までの変化が描かれている。7/7 のところで縦に線が引かれており、これよりも左側はオフライン部門、右側はオンライン部門である。ベスト 10 となったチームの成績は区別がつくように線種を変え、残りのチームは薄い実線のグレーで表した。ただし、快適性を無視してすべての空調を停止すればエネルギー削減量が大きくなることは自明であるため、ERR の順位の決定においては、DRR が 0 以上である運転のみを有効とした。

いずれの評価指標においても、特定のチームが独走しておらず、一位のチームは入れ替わっている。選手たちはスコアを高めることで互いに順位を入れ替えており、もちろんこの過程で全体の平均スコアも上昇した。全てのスコアはリアルタイムに WEB で公開されるため、他の参加者との優劣が視覚化され、競争を通じて運用の改善が進んだ。順位の入替わりはオフラインピリオドで激しく、オンラインピリオドではやや沈静化する。これには 3 つの理由があるだろう。1 つ目は、様々な運用改善が既に試されてしまい、新たな方法が無くなりつつあったということである。2 つ目は、上位に入賞することが難しいと判断した下位のチームのいくつかが競争をやめたためである。実際、成績下位のチームでは、後半戦でほとんど成績が変化せず横に線が引かれているものがある。3 つ目の理由は、多くの参加者にとって BACnet を使いこなしたオンラインでの制御が難しかったことである。選手権終了後に行ったアンケート調査では 17 通の回答を得た。このアンケートによれば、BACnet で制御したチーム、VPN 接続に失敗したチーム、前半戦と同じ方法で最適化を行ったチーム、はそれぞれ 3、2、12 チームであった。

他の参加者の運用結果の概要（月別のエネルギー消費や不満足者率）も WEB で公開された。選手権終了後に実施した上位のチームへのヒアリングによれば、これらを参考にして自分の運用を改善した参加者もいた。以上に述べた選手権開催中の参加者たちの取り組み方は現実の建物の運用を改善するためのヒントを与える。一般的に建物の運用には明確な比較対象が無い。従って、下手な運用をしてもトラブルになることは少ないが、逆に、努力して上手い運用を行ったとしても誰かに称賛されることも少ない。もちろん、倫理的な運用者は、自分の使命感にもとづいてより優れた運用方法を模索する。しかし、これは非常に孤独な作業である。もしも建物の運用者に、彼らが行ったチューニングの効果を、他者の取り組みとの公正な比較のもとに提供できれば、彼らはさらなるチューニングに励むことになるだろう。これを実現にするシステムはエミュレータを応用すれば構築できる可能性があり、これに関しては Discussions の節で説明する。

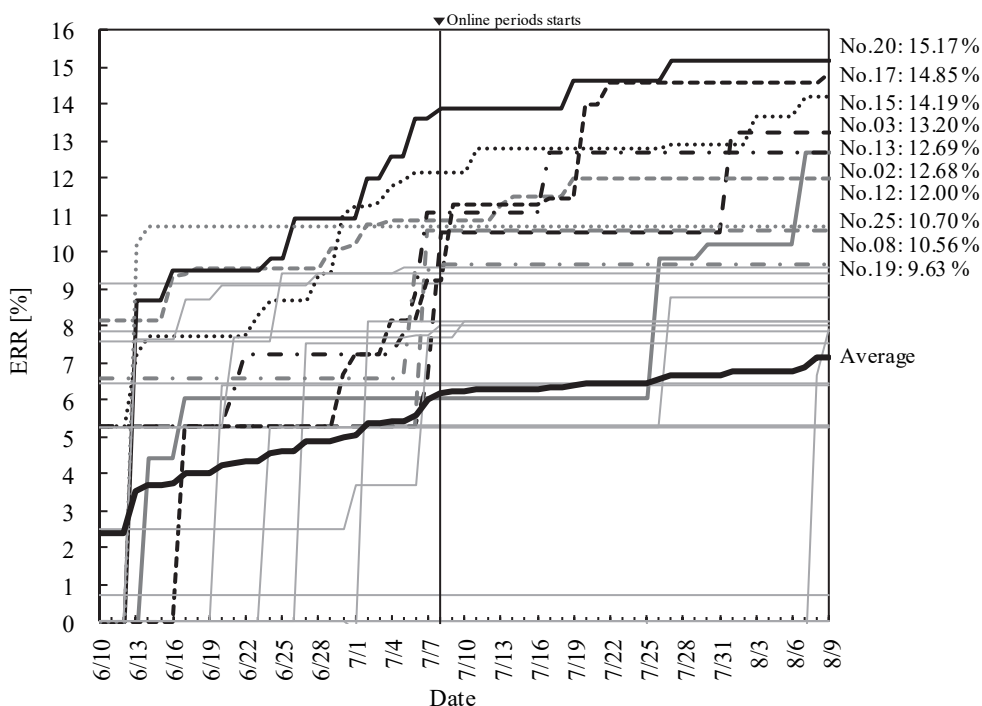


Fig. 12 Changes in ERR (energy saving performance) by team over the course of the championship

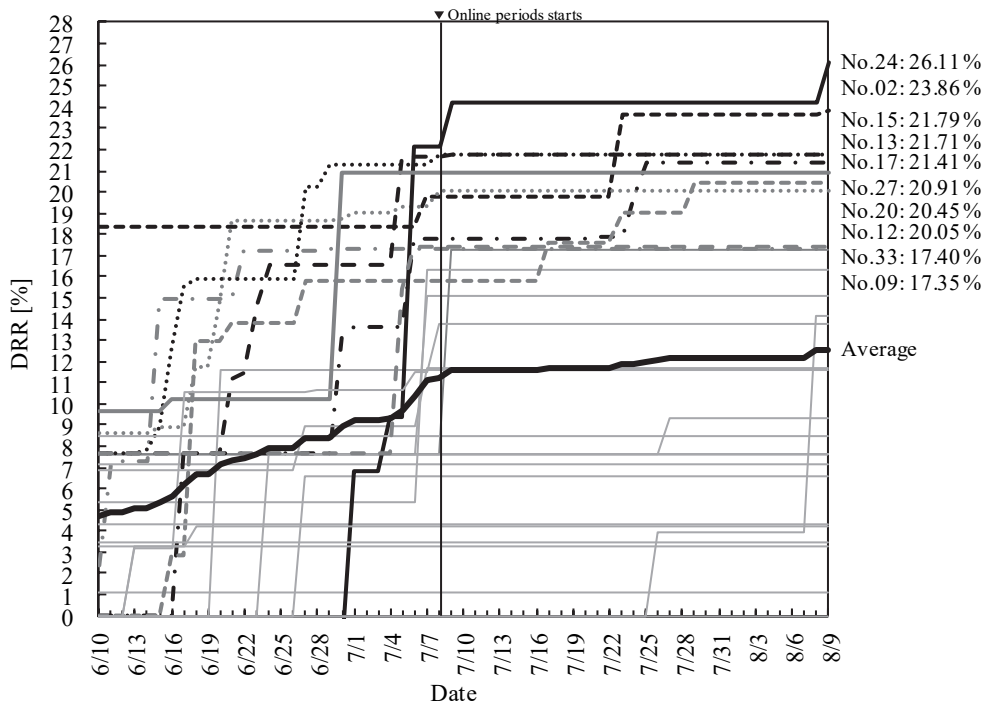


Fig. 13 Changes in DRR (comfort performance) by team over the course of the championship

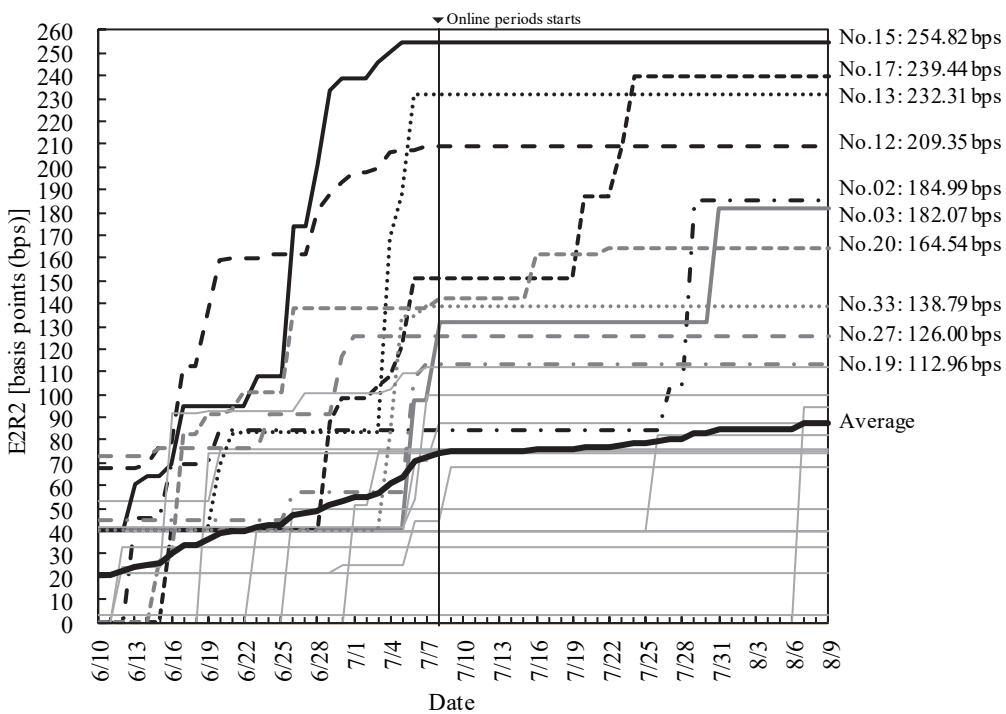


Fig. 14 Changes in E2R2 (comprehensive score) by team over the course of the championship

上位 10 チームの最終成績を Table 2~Table 4 に示す。それぞれのランキングで第一位のチームが異なる。省エネルギー性と快適性はトレードオフの関係にあるため、それぞれのランキングで上位になるためには、総合ランキングで高評価を得るための運用とは異なった運用が必要になる。事実、ERR ランキングで第一位のチームは DRR が低く、DRR ランキングで第一位のチームは ERR が低い。実際、それぞれの部門での上位入賞者へのヒアリングによると、片方の指標に特化した運用を行ったという回答が得られた。

本選手権ではエネルギーと快適性のみを評価したが、現実には投資採算性、堅牢性、省 CO2 性能など、トレードオフの関係にあるいくつかの指標のバランスが求められる。

Table 2 Final scores of the top 10 teams (ERR)

Rank	Team No.	Affiliation	ERR [%]	DRR [%]	E2R2 [bp]
1	20	Kanden Facilities	15.17	1.31	19.99
2	17	Kanden Energy Solution	14.85	13.68	203.24
3	15	Sanko Air Conditioning	14.19	15.29	216.98
4	03	Nihon Sekkei	13.20	13.78	182.07
5	13	Shibaura Institute of Technology	12.69	11.065	147.97
6	02	Hokkaido University	12.68	9.89	125.52
7	12	Kyushu University, Sumiyoshi lab.	12.00	14.47	173.84
8	25	Anonymous	10.70	1.45	15.58
9	08	Waseda University, Tanabe lab.	10.56	6.71	70.95
10	19	Anonymous	9.63	11.72	112.96

Table 3 Final scores of the top 10 teams (DRR)

Rank	Team No.	Affiliation	ERR [%]	DRR [%]	E2R2 [bp]
1	08	Kogakuin University	-20.42	26.11	0.00
2	02	Hokkaido University	-12.20	23.86	0.00
3	15	Sanko Air Conditioning	10.94	21.79	238.49
4	13	Shibaura Institute of Technology	10.07	21.71	218.80
5	17	Kanden Energy Solution	11.18	21.41	239.44
6	27	Anonymous	4.06	20.91	85.05
7	20	Kanden Facilities	2.10	20.45	42.95
8	12	Kyushu University, Sumiyoshi lab.	10.44	20.05	209.35
9	33	Kansai Electric Power	7.73	17.40	134.63
10	09	Tokyo Polytechnic University	1.19	17.35	20.81

Table 4 Final scores of the top 10 teams (E2R2)

Rank	Team No.	Affiliation	ERR [%]	DRR [%]	E2R2 [bp]
1	15	Sanko Air Conditioning	12.15	20.96	254.82
2	17	Kanden Energy Solution	11.18	21.41	239.44
3	13	Shibaura Institute of Technology	11.05	21.01	232.31
4	12	Kyushu University, Sumiyoshi lab.	10.44	20.05	209.35
5	02	Hokkaido University	10.17	18.17	184.99
6	03	Nihon Sekkei	13.20	13.78	182.07
7	20	Kanden Facilities	8.67	18.96	164.54
8	33	Kansai Electric Power	8.03	17.27	138.79
9	27	Anonymous	7.29	17.27	126.00
10	19	Anonymous	9.63	11.72	112.97

3) Score distribution

すべての計算結果の得点の分布を Fig. 15 と Fig. 16 に示す。ERR と DRR はプラスとマイナスの範囲に広く分布していることがわかる。ERR よりも DRR の分布が広く、改善可能性の幅が大きい。

ERR の標準偏差は約 6%、DRR の標準偏差は約 25%であり、運用のみでもエネルギーと快適性にかなりの影響があることがわかる。参加者は全ての計算をサーバーで行っておらず、自分のローカル PC でも検討していると思われる。このような計算も含めれば、運用方法による性能のばらつきは、さらに大きくなるだろう。ただし、現実の建物では、建物の管理者は執務者からのクレームを回避するために、よりエネルギーを消費する安全な運用を行う傾向があると推測できる。このため、現実には分布の中心は、ERR では左寄りに、DRR では右寄りになるであろう。

この選手権はもともと建物の運用に関心が強い人々が参加しているはずであるから、彼らの能力は平均よりも高いと予想できる。一方で、現実には、不十分な資金やチームで運用をしなければならない建物も存在しているため、現実社会には今回の結果以上の幅広い分布が潜在しているはずである。

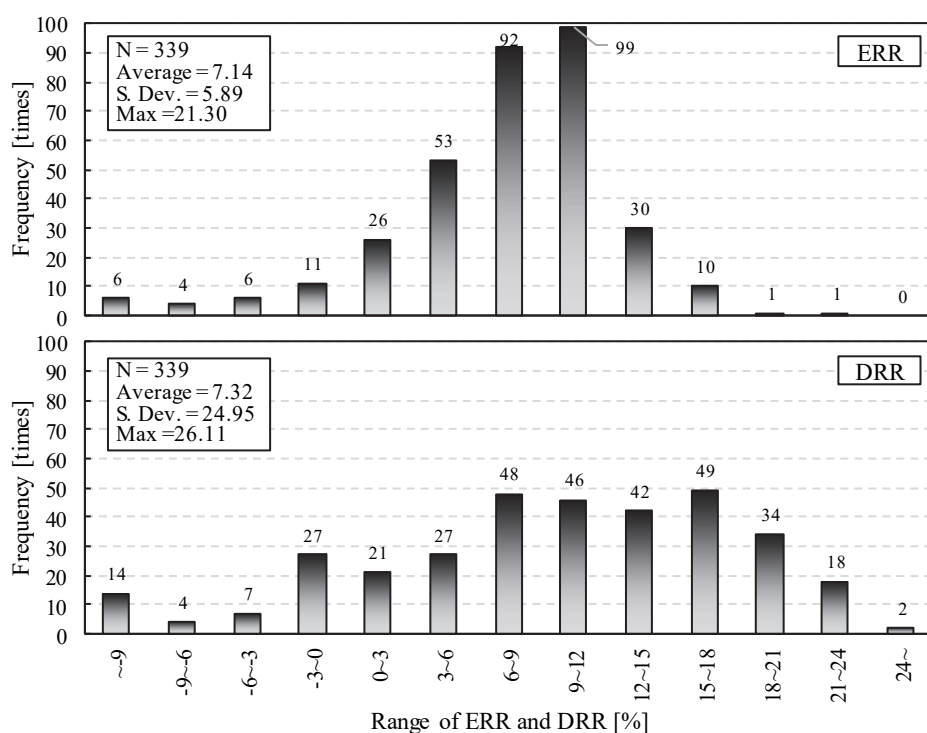


Fig. 15 Frequency distribution of ERR and DRR

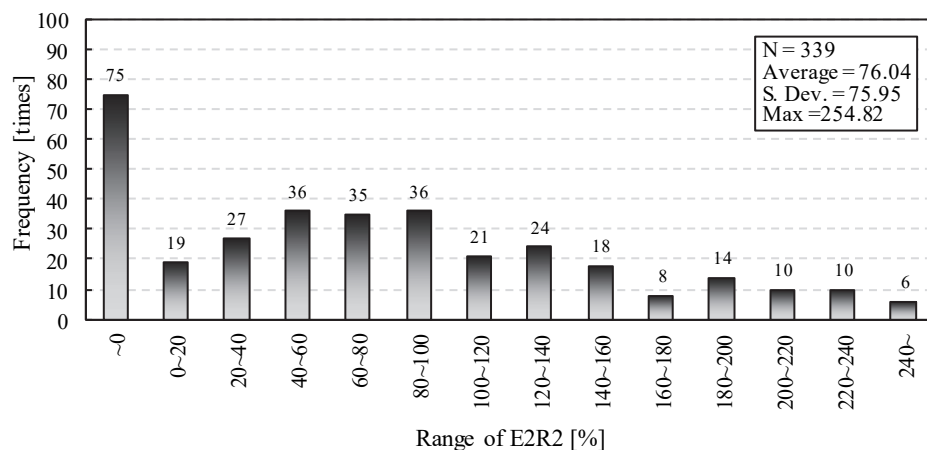


Fig. 16 Frequency distribution of E2R2

4) Points to be improved

本選手権の成績評価に関して、二つの反省点がある。

一つは一次エネルギーを評価する範囲である。デフォルトの運用でのエネルギー消費を Fig. 17 に示す。年間のエネルギー消費原単位は $1,109 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ である。Eq. 3 の ERR の計算では、この値を基準のエネルギー消費 E_R とした。照明とコンセントの消費電力も評価に含めた理由は、建物全体の一次エネルギー消費で評価するためである。しかし、結果として全体に占める空調のエネルギー消費の比率が小さくなった。この選手権では主に制御可能な設備は空調設備であったため、ERR の変化幅が小さくなった。例えば、HVAC のエネルギー消費は全体の 35%程度に過ぎないため、それを半減できたとしても、ERR は $35 \times 0.5 = 17.5\%$ にしかならない。DRR に比較すると ERR の変化幅が小さ過ぎ、トレードオフを検討するゲームとしては面白みが減少した。ただし、ブラインド制御は照明と空調の両方のエネルギー消費に影響を与えるため、照明のエネルギーは単純に無視することはできない。ペリメータの照明のエネルギーのみを評価するべきであった。一方、コンセントのエネルギー消費は、制御できない固定値であるから、そもそも合計しない方が明快であった。

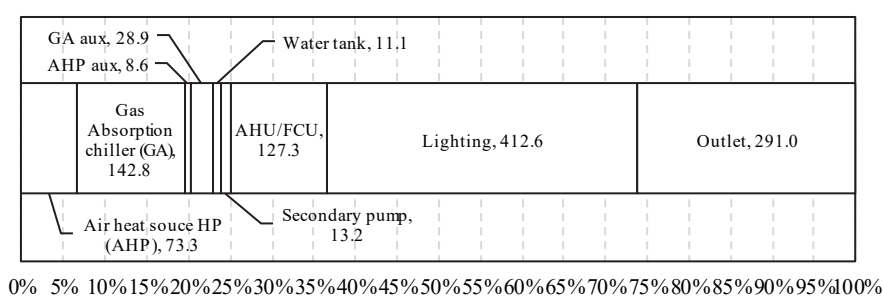


Fig. 17 Energy consumption rate under default operation

もう一つの反省点は、不確実性の表現方法である。オフライン部門では全く同一の乱数シードを使ったため、すべてのトライアルは全く同じ気象条件と執務者の条件で行われた。オンライン部門では制御プログラムがいくらかでも複雑にできるため、現実には不確実である気象条件を、完全に予測した上で制御ができてしまう。これは、ある特定の条件にオーバーフィットした制御であり、好ましくない。そこで、このような制御に対してペナルティを与えるために、オンライン部門では、計算を行うたびに乱数シードが変化するようにした。しかし、計算のトライアルごとに気象条件や執務者の行動がばらばらになったため、エネルギー消費や不満足者率の絶対値を相互に比較することは難しくなった。本選手権ではオンライン制御に挑戦した参加者は少なかったため、計算結果の相互比較可能性を重視して乱数シードを固定した方が良かった。

以降の節では参加者の成績を簡単に比較する。さらに詳細な分析ができるように、WEB サイトには全参加者の運転データを公開した。

5) Comparison of energy consumption

各チームで E2R2 が最大となった運用に関して、空調のエネルギー消費量と比率を Fig. 18, Fig. 19, Table 5 に示す。

空気熱源ヒートポンプを優先して稼働するチームと、直焚吸収冷凍機を優先するチームの 2 つに大きく分かれた。成績上位 3 チームである No. 3, No. 17, No. 15 は、いずれも直焚吸収冷温水器を全く運転させておらず、すべての熱を空気熱源ヒートポンプで製造している。今回の問題では、最適化対象のオフィスの 3 階のテナントは不在であり、また、テナントごとに活動のスケジュールが異なったため、設計上のピーク負荷は発生しなかった。

蓄熱槽の蓄熱放熱ポンプのエネルギー消費もチームごとにより異なる。成績が高いチームは、蓄熱槽を用いるスケジュールを調整することによって、空気熱源ヒートポンプの稼働時間を伸ばしたと推測できる。

多くのチームが基準値よりも空調機のエネルギー消費を増大させる中、No. 17 は減少側に変更できている。No.17 へのヒアリングによれば、それぞれのテナントの活動に合わせて空調機の稼働時間を縮減したことが理由である。

No. 17 と No. 15 は二次ポンプのエネルギー消費もほぼ半減させることに成功している。成績が上位のチームの中では、ポンプの必要差圧を推定する式のパラメータを調整していたのは彼らだけであった。

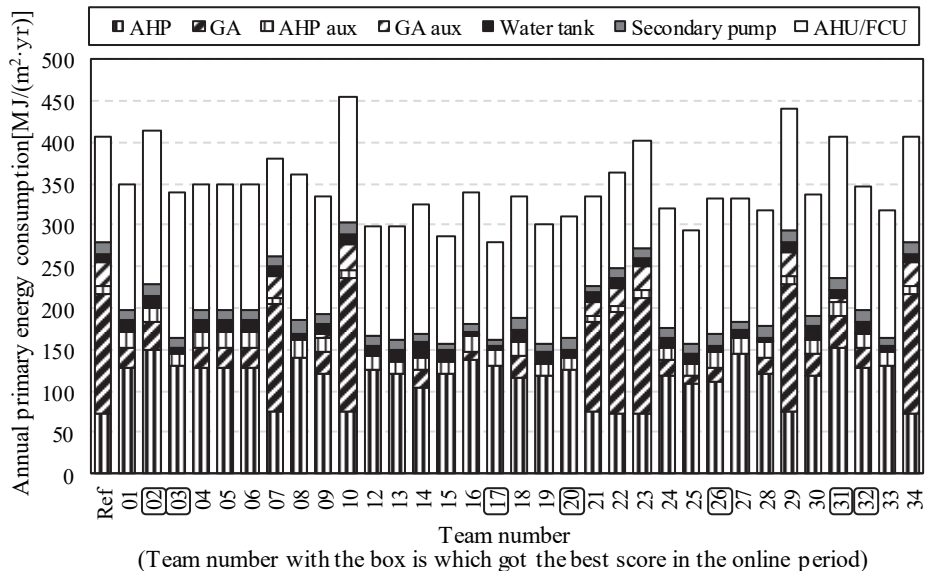


Fig. 18 Primary HVAC energy consumption obtained by each team

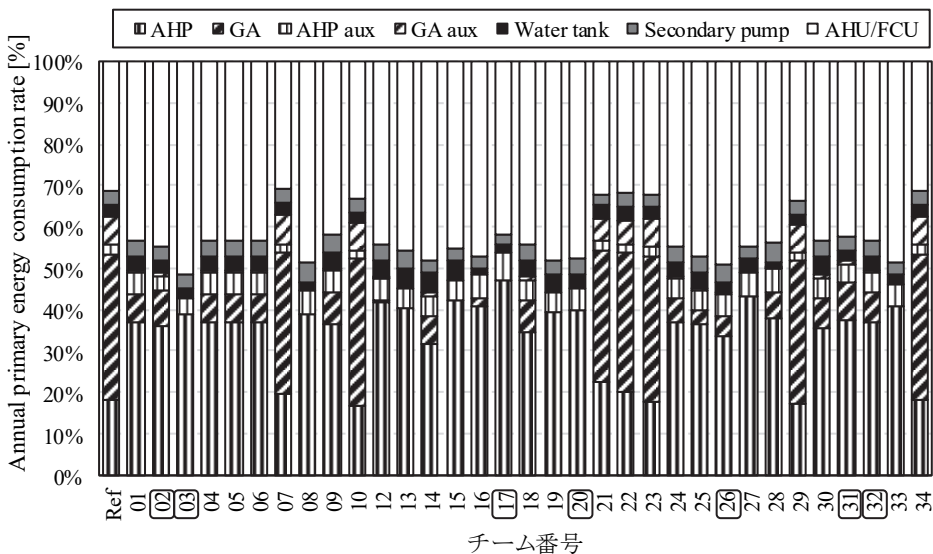


Fig. 19 Primary HVAC energy consumption rate obtained by each team

Table 5 Primary HVAC energy consumption obtained by each team [MJ/(m²·yr)]

No.	AHPM	GAR	AHPM auxiliary	GAR auxiliary	Water tank pump	Secondary pump	AHU / FCU
Ref.	73.2	143.6	8.6	28.8	11.1	13.2	127.3
01	128.7	23.5	18.1	2.5	11.6	14.1	150.2
02	149.3	34.8	15.3	3.1	11.7	14.3	184.8
03	130.8	0.0	13.7	0.0	8.2	11.9	173.5
04	128.7	23.5	18.1	2.5	11.6	14.1	150.2
05	128.7	23.5	18.1	2.5	11.6	14.1	150.2
06	128.7	23.5	18.1	2.5	11.6	14.1	150.2
07	75.2	129.5	7.5	26.2	10.9	12.9	117.1
08	140.0	0.0	21.9	0.0	6.3	16.8	176.2
09	121.4	25.3	17.7	3.1	12.4	13.9	139.8
10	75.9	160.8	8.7	31.4	11.3	14.8	150.6
12	124.1	2.4	14.9	0.3	12.9	11.5	132.1
13	120.2	0.0	15.4	0.0	13.3	13.2	136.9
14	103.3	21.8	15.1	2.3	16.5	9.5	155.3
15	121.1	0.0	14.7	0.0	14.0	7.3	130.3
16	138.5	7.6	19.9	0.6	3.6	9.7	160.5
17	130.6	0.0	19.9	0.0	4.8	6.3	117.2
18	115.2	27.2	15.8	2.2	13.1	13.3	148.2
19	117.8	0.0	14.3	0.0	14.4	9.0	145.0
20	124.2	0.0	15.9	0.0	10.1	13.0	146.9
21	75.2	107.2	8.4	17.4	10.5	7.9	108.8
22	73.2	121.2	8.6	20.9	11.1	12.3	115.3
23	71.5	141.4	8.6	27.6	10.4	13.3	128.5
24	118.6	18.0	14.9	2.0	10.8	12.3	142.8
25	108.0	9.1	14.9	1.5	10.3	12.3	138.1
26	111.2	17.2	17.5	1.8	7.5	14.3	163.2
27	143.5	0.0	19.1	0.0	11.4	9.2	147.9
28	119.9	19.8	18.3	1.2	4.5	14.5	139.0
29	75.5	153.9	8.8	28.6	11.4	14.3	148.8
30	119.0	24.3	17.3	2.7	14.1	13.6	145.8
31	152.0	38.1	17.6	3.5	10.0	14.0	171.9
32	127.6	25.0	16.9	2.2	10.8	13.9	149.0
33	130.5	0.0	15.8	0.0	7.8	9.1	154.8
34	73.2	143.6	8.6	28.8	11.1	13.2	127.3

6) Comparison of thermal comfort

各チームで E2R2 が最大となった運用に関して、月別の不満足者率を図 5 15 に示す。夏季に関してはいずれのチームも安定して低い不満足者率である。冬季は夏季よりもかなり不満足者率が高く、チームごとのばらつきも夏季より大きい。夜間に躯体が非常に冷えるために、暖房開始時の温熱環境が夏季よりも悪いことが一つの理由である。また、冬の朝は暖房であるが、昼過ぎから冷房に切り替える必要があり、この切り替えのタイミングを設定することが難しいことも理由である。2 つのチームが、冷暖房を行わずに換気のみで中間期（4 月と 11 月）を過ごそうと挑戦したが、不満足者率は極めて高くなり、これは失敗に終わった。

チームごとの年間の延不満足者数を Fig. 21 に示す。No. 21 と No. 22 は中間期に空調を行わなかったため、不満足者数が大きく拡大した。

チームごとの月別の不満足者率を Fig. 22 に示す。ばらつきは 11 月が最も大きく、これについて 4 月が大きかった。これらの中間期の運用の良否が成績の差に大きな影響を与えたと推測できる。また、成績が上位であった No. 12、No. 15、No. 17 はいずれも 1 月や 2 月などの冬季において明らかに他のチームよりも不満足者率が低い。

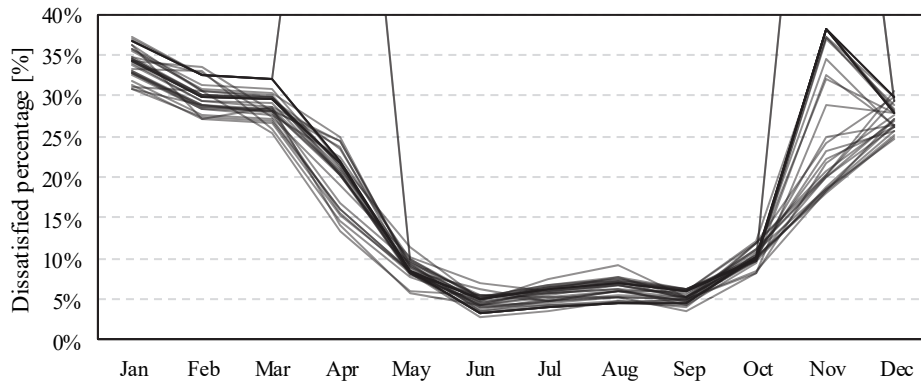


Fig. 20 Monthly dissatisfaction percentage obtained by each team at maximum E2R2

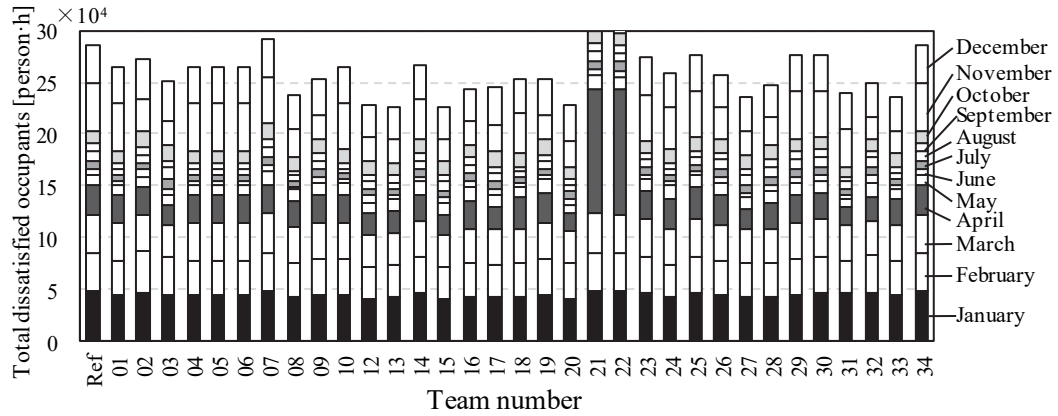


Fig. 21 Total number of dissatisfied occupants by team

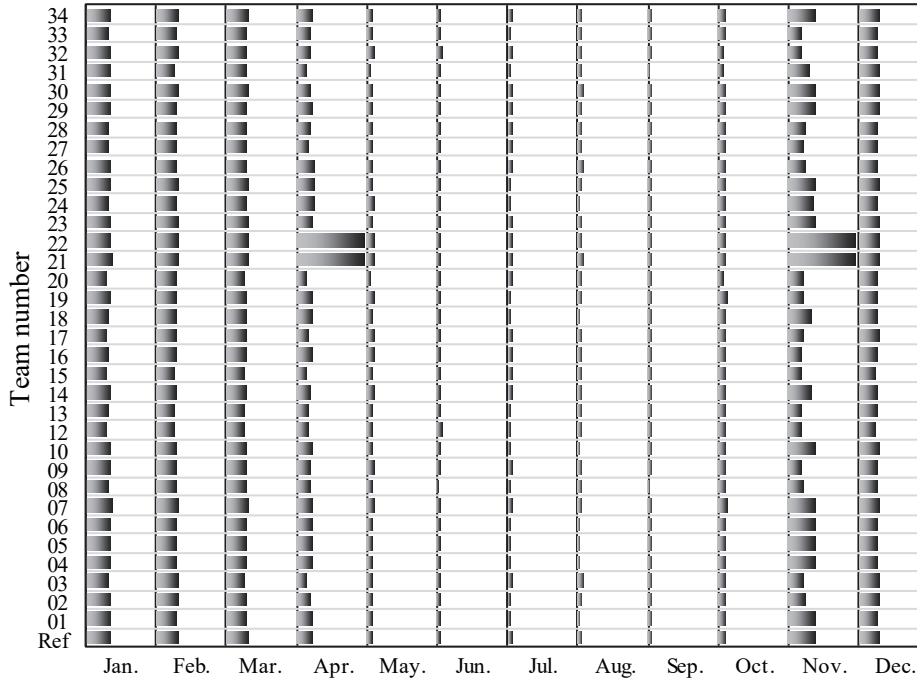


Fig. 22 Monthly dissatisfaction percentage obtained by each team

5. Discussion

本研究では、エミュレータを用いて建物の運用能力を競う選手権について報告した。

いくつかの先行事例が示したように、このようなオープンな選手権は、競争を通じて新たな技術開発や技能の向上を促進する。我々の選手権においても、複数の参加者たちが相互に成績を参照しながら運用性能を向上させていく様子が見られた。現在の建物運用は十分に競争原理が働いておらず、運用管理を行う者達は建物ごとに独立である。しかし、競争を通じて運用を改善するためには、何らかの方法で運用性能を相互に比較できるようにする必要がある。従来は、建物が一品生産品であるため、このような相互比較は難しかった。しかし、シミュレーション技術が発達したため、仮想的に同一の建物の運用を行うことが可能になりつつある。近年では BIM の普及に伴って、現実の建物と全く同じように振る舞う建築をデジタル空間に建設する「Digital twin」という概念が登場している (Kaewunruen 2018; Lydon 2019)。Digital twin の概念は運用の仮想化という目的も含めて設計されるべきであろう。Digital twin によって仮想的な運用が可能になれば、以下に記すように建物の運用というサービスを完全市場で取引できるようになる可能性がある。

本選手権のシステムと同じように、BACnet 通信と VPN を用いて建物を操作できるようなシステムとすれば、建物の運用は場所による制約が無くなる。現在は、建物の運用は特定の管理者が継続的に実施することが通常であるが、本選手権と同じシステムが構築できれば、ダイナミックに運用管理者を入れ替えることができる可能性がある。つまり、いくつもの運用者候補達が並行してバーチャル建築に対する仮想的な運用を行い、最も良い運用成績をあげた管理者のネットワークを現実の建物に接続するという方法である。現実の建物と全く同じ応答をしめすバーチャル建築がネットワーク上に並列して存在することになる。これらの建物は無数に複製されるため Digital twin というよりは Digital clones と呼ぶ方が良いかもしれない。上記のような運用者の切り替えを行う場合には、建物の運用に対する報酬は、現実の建物への接続時間に応じて支払われるべきである。このような仕組みが構築できれば、建物の運用というサービスは完全競争市場で取引されることができると期待される。もちろん、より安価に質の良い建物運用戦略を提案できる運用者が競争力を持つ。このため、サービスの提供者たちは、機械学習などの技術を駆使して自動的に安価に優れた運用方策を提供するソフトウェアを開発し始めるであろう。幸いなことに、エミュレータは建物の不確実性が表現できるため、機械学習の性能を確認する上では都合が良い。また、いくらでも複製できるため、強化学習のモデルとしても役立つ。一方、この完全市場を需要者側から見ると、より多くの報酬を示したオーナーが、より優秀な建物運用者からのサービス提供を受けることになる。

この選手権ではすべてのモデルを著者らがスクラッチから開発した。しかし、仮に上記のようなサービスを実現するのであれば、モデルのリアリティを更に高める必要がある。このためには、エミュレータをコンポーネントに分割し、機器のモデルは製造者から提供してもらうべきであろう。この場合、Modelica のようなモデルベースの開発は有力な手段となろう (IEA 2017; Wimmer 2015; Kim 2015; Pinheiro 2018)。製造者にとって機器モデルの提供は新たな負担になる。しかし、これまで以上に運用段階の多様な使われ方に関する情報が得られるようになり、これらの情報は彼らが新たな技術開発を行う際に助けになるだろう。

本選手権のもう一つの価値は、建物運用に関する潜在的な価値を明らかにした点である。建物を快適かつ省エネに維持するためには、優れたハードウェアだけでは足りず、適切な運用が必要であることは多くの者が指摘してきた。しかし、建物は一品生産品であるために、仮に現実とは異なる運用であったならば何が起こったのかはわからない。本選手権の結果によれば、社会の平均と比較すると相対的に能力の高い参加者たちでさえ、運用成績に大きな差異が生じることがわかった。また、同一の参加者であっても、運用を重ねることで運用の性能を向上できる傾向が表れた。設備のハードウェアは全く同一条件であるため、このような差異は純粋に運用に起因するものであったことは強調する必要がある。今回のような選手権を繰り返すことで、運用の能力という潜在的な価値を、より定量的に評価することができるようになるであろう。このような潜在的価値の認識は、ライフサイクルで建物の価値を最大化することに貢献する。

既に述べたように、本選手権で各参加者が記録した運用データはすべて Web サイトで公開している。また、エ

ミュレータシステムもソースコードを含めて全てダウンロードできるため、誰でも仮想的な運用を試して自分のチューニング能力を評価することができる。ソースコードは **General Public License** で公開したため、自由に改変され、より優れたエミュレータが開発されることを願っている。

References

- Bushby, S. T., Castro, N., Galler, M. A., and Park, C. 2001. "Using the Virtual Cybernetic Building Testbed and FDD Test Shell for FDD Tool Development." *National Institute of Standard and Technology: NISTIR 6818*
- Bushby, S. T., Ferretti, N. M., Galler, M. A., and Park, C. 2010. "The Virtual Cybernetic Building Testbed – A Building Emulator." *ASHRAE Transactions*. 116 (1): 37–44
- Chau, C., K., Leung, T., M., and Ng, W., Y. 2015. "A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings". *Applied Energy*. 143: 395–413. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.023
- Chonan, Y., Nishida, K., and Matsumoto, T. 1996. "A Bayesian Non-linear Regression with Multiple Hyperparameters on the ASHRAE II Time Series Data". *ASHRAE Transactions*. 102 (2) : 405–411
- Dodier, R. and Henze, G. 1996. "A Statistical Analysis of Neural Networks as Applied to Building Energy Prediction". *Proceedings of the 1996 ASME/JSME International Solar Energy Conference* : 495–506
- DOE (Department of Energy). 2015. *A Common Definition for Zero Energy Buildings*. Washington, D.C.: U.S Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Accessed December 1, 2018. http://energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/bto_common_definition_zero_energy_buildings_093015.pdf.
- European Parliament, Council of the European Union. 2010. *Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Article 9 Nearly zero-energy buildings*, Official Journal of the European Union
- Feuston, B., P., and Thurtell, J. H. 1994. "Generalized Non-linear Regressions with Ensemble of Neural Nets: The Great Energy Predictor Shootout". *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1075–1080
- Haberl, J., and Thamilsaran, S. 1996. "Predicting Hourly Building Energy Use: The Great Energy Predictor Shootout II: Measuring Retrofit Savings — Overview and Discussion of Results". *ASHRAE Transactions*. 102 (2) : 419–435
- Iijima, J., Takagi, K., Takeuchi, R., and Matsumoto, T. 1994. "A Piecewise — linear Regression on the ASHRAE Time Series Data". *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1088–1095
- International Energy Agency (IEA). 1997. *Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ECBCS). Summary of IEA Annexes 16 and 17, Annex 17 – Building Energy Management Systems (BEMS) – Evaluation and Emulation Techniques*
- International Energy Agency (IEA). 1999. *Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ECBCS). Annex 25 –Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnostics*
- International Energy Agency (IEA). 2008. *Worldwide Trends in Energy use and Efficiency*. New Milford, Connecticut, USA: Turpin Distribution.
- International Energy Agency (IEA) 2017. *Energy in Buildings and Communities Programme (ECB). IEA Annexes 60 Final Report – New Generation Computational Tools for Building & Community Energy Systems*.
- Jang, K.-J., Bartlett, E., and Nelson, R. 1996. "The Great Energy Predictor Shootout II: Measuring Retrofit Energy Savings Using Autoassociative Neural Networks". *ASHRAE Transactions*. 102 (2) : 412–418
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P., and Welsh, J. 2018. "A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings." *Sustainability*. 11 (159): doi: 10.3390/su11010159
- Katipamula, S. 1996. "The Great Energy Predictor Shootout II: Modeling Energy use in Large Commercial Buildings". *ASHRAE Transactions*. 102 (2) : 397–404
- Kawashima, M. 1994. "Artificial Neural Network Backpropagation Model with Three-phase Annealing Developed for the Building Energy Predictor Shootout". *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1096–1103
- Khoury, J., Alameddine, Z., and Hollmuller, P. 2017. "Understanding and bridging the energy performance gap in building

- retrofit.” *Energy Procedia*. 122: 217–222. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.348
- Kim, J., B., Jeong, W., Clayton, M., J., Haberl, J., S., and Yan, W. 2015. “Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation.” *Automation in Construction*. 50: 16-28, doi: 10.1016/j.autcon.2014.10.011
- Kreider, J., F., and Haberl, J., S. 1994. “Predicting hourly building energy use: The great energy predictor shootout – overview and discussion of results”. *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1104–1118
- Lebrun, J. and Wang, S. W. 1993. “Evaluation and Emulation of Building Energy Management Systems - Synthesis Report, IEA Annex 17 Final Report”, University of Liege, Belgium
- Lydon, G., P., Caranovic, S., Hischier, I., and Schlueter, A. 2019. “Coupled simulation of thermally active building systems to support a digital twin.” *Energy & Buildings*. doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.015
- MacKay, D. 1994. “Bayesian Non-linear Modeling for the Energy Predictor Competition”. *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1053–1062
- Mills E., Friedman, H., Powell, T., Bourassa, N., Claridge, D., Haasl, T., and Piette, M. A. 2004. “The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning: a meta-analysis of energy and non-energy impacts in existing buildings and new construction in the United States.” LBNL – 56637, Lawrence Berkeley National Laboratory
- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). 2015. Definition of ZEB and future measures proposed by the ZEB Roadmap Examination Committee. Accessed December 1, 2018. http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeb_report/pdf/report_160212_en.pdf
- Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L, and Acquaye, A. 2013. “Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends”. *Energy and Buildings*. 66 : 232–245. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.026
- Nguyen, A., Reiter, S., and Rigo, P. 2014. “A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis.” *Applied Energy*, 113: 1043–1058. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.061
- Ohlsson, M., Peterson, C. Pi, H., Rognvaldsson, T., Soderberg, B. 1994. “Predicting Utility Loads with Artificial Neural Networks – Methods and Results from ‘The Great Energy Predictor Shootout’ ”. *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1063–1074
- Ono, E., Ito, S., and Yoshida, H., 2017. “Development of test procedure for the evaluation of building energy simulation tools.” *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*: 380–388, <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.10z>
- Pinheiro, S., Wimmer, R., O’Donnell, J., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., Frisch, J., and Treeck, C. 2018. “MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation.” *Automation in Construction*, 90: 91-103, doi: 10.1016/j.autcon.2018.02.009
- Rumelhart, D., E., Hinton, G., E., and Williams, R., J. 1986. “Learning representations by back-propagating errors”. *Nature*, 323 (6088): 533–536. doi: 10.1038/323533a0
- Sartori, I., Hestnes, A. G. 2007. “Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings”. *Energy and Buildings*. 39 : 249–257. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.07.001
- SHASE (Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan), 1998. “Research on fault diagnosis and optimization of heat storage HVAC system (in Japanese)”. Final report of committee of heat storage optimization
- SHASE (Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan), 2016. “SHASE-G 1008-2016, Guideline of test procedure for the evaluation of building energy simulation tool.”
- Stevenson, W. J. 1994. “Predicting Building Energy Parameters Using Artificial Neural Nets”. *ASHRAE Transactions*. 100 (2): 1081–1087
- Togashi, E., and Miyata, M. 2019. “Development of building thermal environment emulator to evaluate the performance of the HVAC system operation.” *Journal of Building Performance Simulation*: doi: 10.1080/19401493.2019.1601259

- Togashi, E. and Tanabe, S., 2009. "Methodology for developing heat-load calculating class library with immutable interface." *Technical Papers of the Annual Meeting of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan: 1995–1998*, https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2009.3.0_1995
- Vaezi-Nejad, H., Hutter, E., Haves, P., Dexter, A. L., Kelly, G., Nusgens, P., and Wang, S. W. 1991. "The use of building emulators to evaluate the performance of building energy management systems." *Proceedings of Building Simulation 1991 Conference*. 209–213
- Wilde, P. 2014. "The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation." *Automation in Construction*. 41: 40–49. doi:10.1016/j.autcon.2014.02.009
- Wimmer, R., Cao, J., Remmen, P., and Maile, T. 2015. "Implementation of Advanced BIM-Based Mapping Rules for Automated Conversions to Modelica." *Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*: 7-9