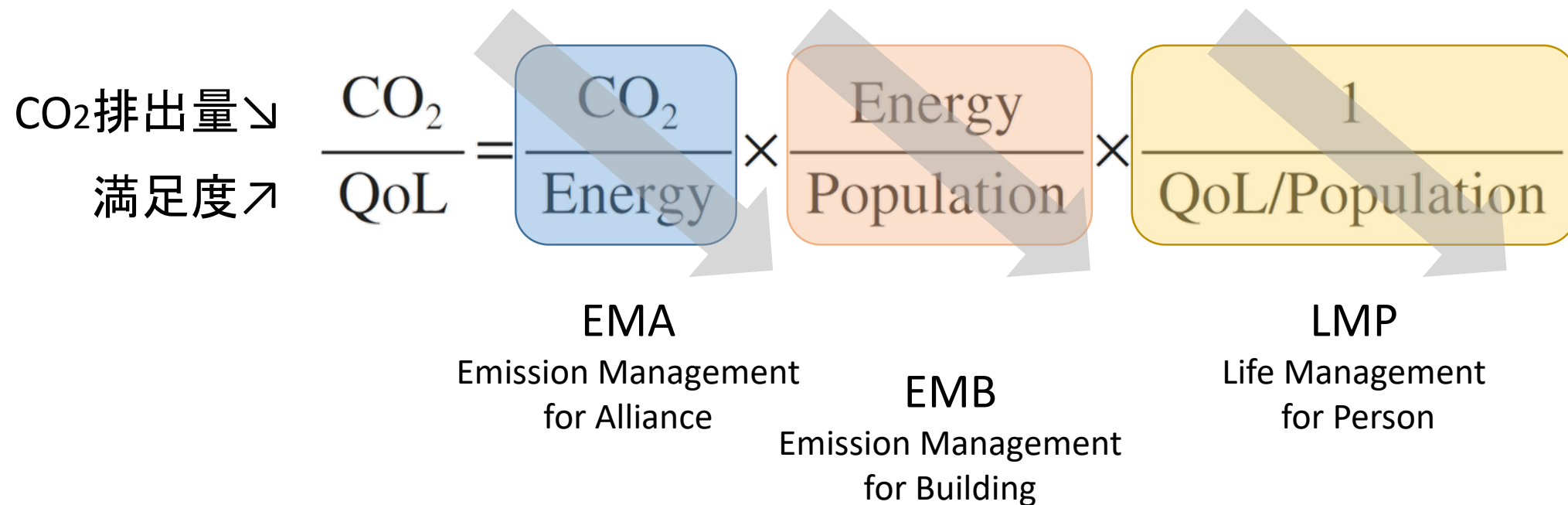




脱炭素化とQoL向上を両立するビルマネジメント

KPIの三項分解の考え方に基づいた マネジメント連携のための要素研究の紹介





デモシステム

情報発信による温冷感
満足度向上に基づく空調制御

EMB: LMPからの要求設定温度に
基づく空調制御

↑ ↓

LMP: EMBの空調制御に基づく居
住者への推奨座席の情報発信

既往研究応用 デモシステム

コミショニングに基づく空調システムの
不具合検知・診断と最適制御

要素研究紹介 デモシステム

温熱環境に対する
満足度予測モデルの開発

要素研究紹介 デモシステム

情報提供による
省エネルギー行動の誘発

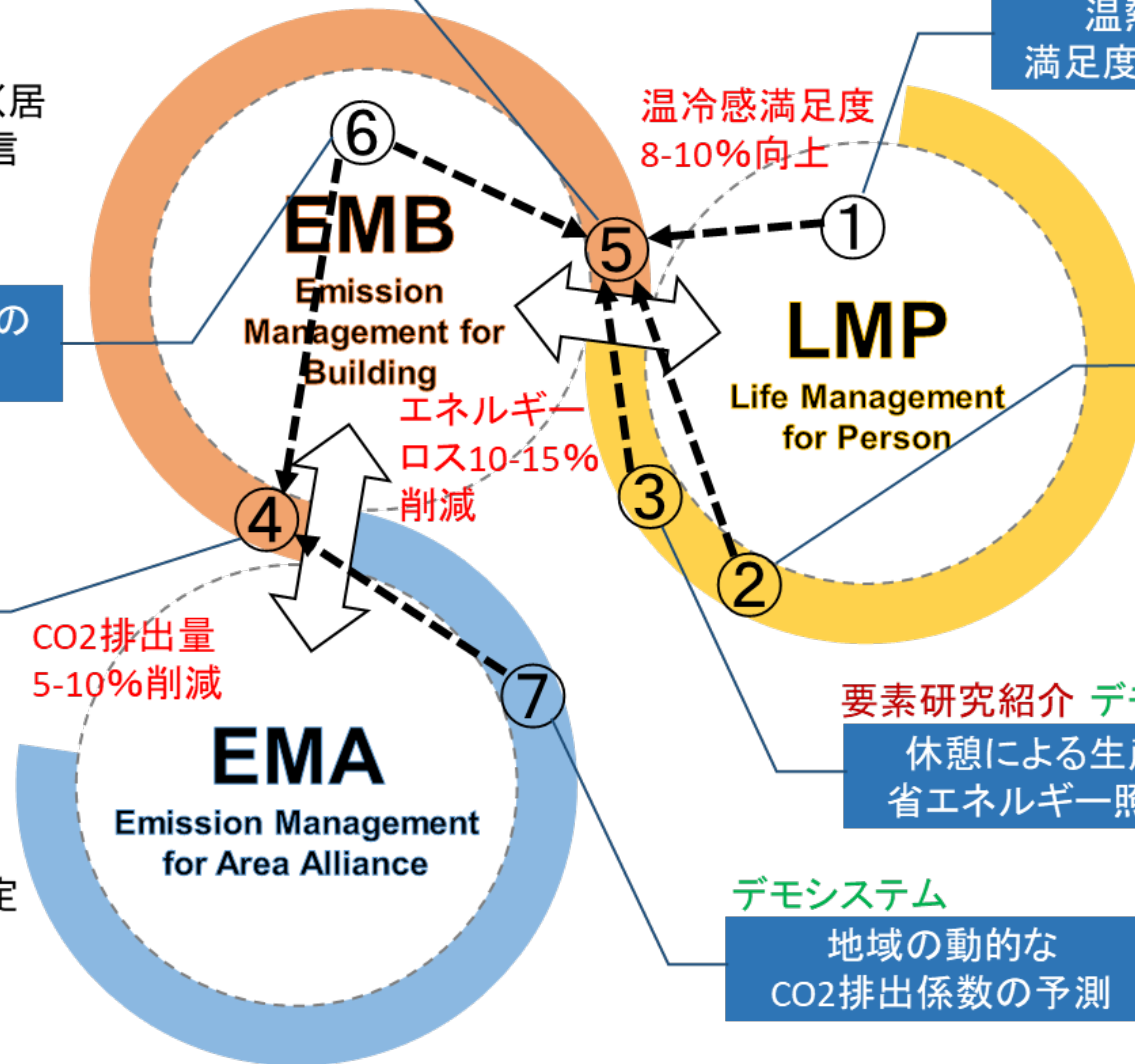
要素研究紹介 デモシステム

休憩による生産性向上と
省エネルギー照明システム

デモシステム

地域の動的な
CO2排出係数の予測

$$\frac{CO_2}{QoL} = (0.95 \sim 0.90) \times (0.90 \sim 0.85) \times \left(\frac{1}{1.08} \sim \frac{1}{1.10} \right) \cong 0.8 \sim 0.7$$





① 温熱環境に対する満足度予測モデルの開発

研究目的

温熱環境に対する満足度を精度よく予測できる確率モデルの開発

研究背景

- 情報発信による空間の価値創出
 - ・ 屋外空間の価値→訪問者数
 - ・ 室内空間の価値→作業効率
 } 温熱環境に対する満足度の影響が大きい
- 人の行動を変えられない情報
 - ・ 既往のアプローチ：温熱環境の予測（温湿度・風速など）
 - ・ 個人差の影響の大きい温冷感の予測は困難
 - ・ 個人差を無視する一般傾向としての情報（温度等）は行動変容に効かない
- 現実離れの評価指標
 - ・ 多く活用される指標：PMV(Predicted Mean Vote; Fanger, 1969)
 - ・ 物理量から一義的に算出されるものの、同一PMVの環境に置かれたとしても人の温冷感にはばらつきが存在
 - ・ PMVは、「多数の人の温冷感の平均値」もしくは「平均的な人の温冷感」
 - ・ 個人特性ではなく、一般傾向に近い

既往の評価指標と実際の居住者満足度とは乖離

- ✓ 温冷感とは、ばらつきが存在する確率的なものにもかかわらず、従来の予測モデルは決定論的に予測・評価しているため、取り組む問題の特徴とソリューション方法論の間に矛盾がある
- ✓ 階層ベイズ統計アプローチを用いて個人特性と一般傾向を同時に推定
- ✓ 物理量と温冷感との関係の不確かさを考慮するために、温冷感のばらつきを予測モデルに組み込む

提案モデルとパラメータ推定

➤ Ordinal probit regression model

PMVやSET*等で定義される温熱環境におかれた被験者の温冷感を予測することを目的として、Ordinal probit 回帰モデルを提案

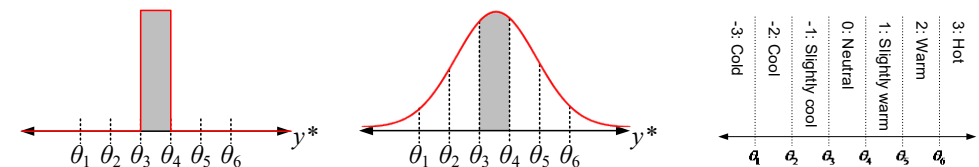


図. 予測手法の違い（左：既往手法、中：提案手法、右：TSV; Thermal Sensation Vote）
（灰色部分の面積＝中立と答える確率）

➤ Parameter estimation using a hierarchical Bayesian approach

- ・ マルチレベルパラメータ（個人特性と一般傾向）を有する階層モデルを採用
- ・ モデルパラメータ間の依存関係を考慮に入れた推定モデルを導入

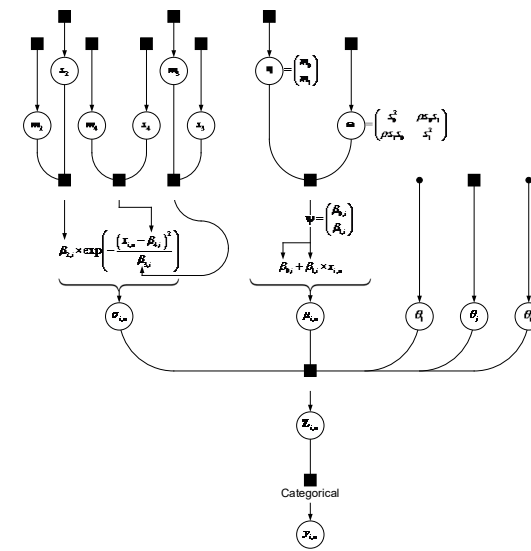


図. モデルパラメータの階層構造



ケーススタディー：屋外空間の温冷感予測

➤ 使用したデータセット

- 15名の被験者から取得した屋外環境（公園の休憩スペース）における温冷感申告（着衣量：0.37 cloおよび代謝量：1metとして制御）
- 被験者がおかれた熱環境をSET*を用いて評価
- 計868ペア（SET* - TSV）のデータ

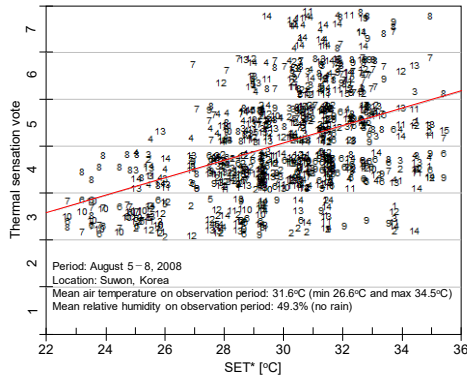
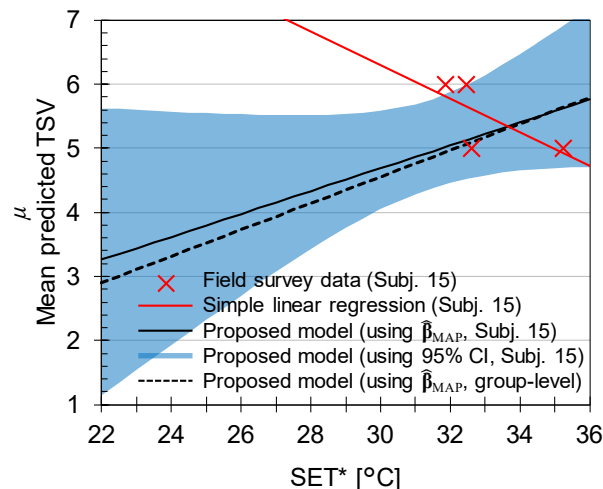


図. 物理量と温冷感との関係（実験値）
被験者の区分のために通し番号を付けている。
赤線は一般傾向（単純線形近似）を表している。

➤ 個人特性と一般傾向との分離



- ある被験者の申告はSET*の上昇に従いTSVが減少する傾向が見られるため、線形回帰による推定直線の傾きは負になる（赤線）
- 提案手法による推定結果は一般傾向を維持できる（黒実線）
- 比較的少ないサンプルからでも信頼できる個人特有の温冷感の予測が可能であるということを示唆
- 行動変容を誘発できる情報の作成手法として期待

図. ある被験者の温冷感の推定結果

ケーススタディー：室内空間の温熱満足度予測

➤ 使用したデータセット

- ASHRAE Global Thermal Comfort Database IIの一部（air-conditioned office in Midland, UK, n=9205）
- PMVにより定義される温熱環境における温冷感申告（7段階）および満足申告（0：不満、1：満足）が格納

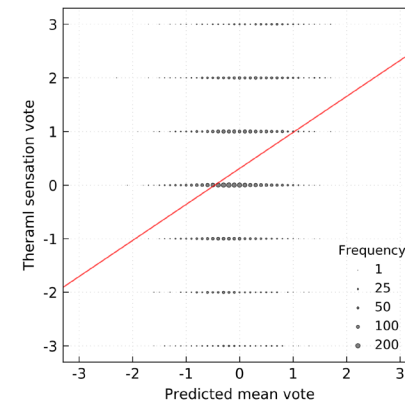
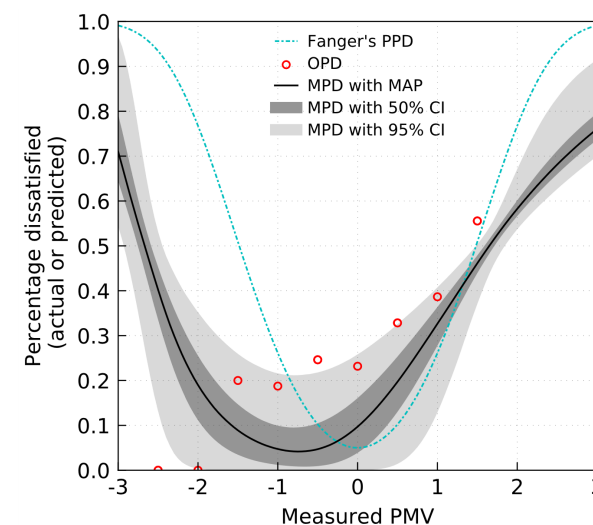


図. 物理量と温冷感との関係（実験値）
赤線は単純線形近似を表している。
データプロットの大きさより0.1 PMV間隔でデータポイント数を表している。

➤ 満足度の予測精度向上



- OPD上のピークは寒い側に偏っているが、PPDによる予測ではその傾向が捕まっていない。
- MPDによる予測では、その傾向を把握でき、またモデルパラメータ95%の信頼区間を利用したモデルでは、ほとんどのデータポイントを含めている。

図. 物理量と満足度との関係
PPD：既往指標
OPD：実験結果
MPD：提案手法による予測結果



②情報提供による省エネルギー行動の誘発

研究目的

公共空間における情報提供による無駄電力削減効果の定量化

研究背景

➤ ソフト面からの省エネルギー化

- 建築物の省エネルギー化促進のためには、建築外皮の高性能化や設備システムの高効率化だけでなく、在室者の行動に着目することも重要

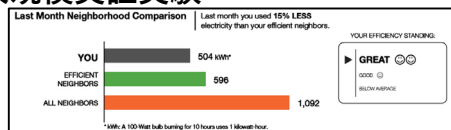
➤ Nudge (ナッジ)

- 原義：ひじでそっと突く、(人の) 注意を引く、(ある状態などに) 近づく
- 行動経済学
 - 選択肢の限定や経済的インセンティブの大きな変更なく、予測可能な形で人々の行動をかえるような制度やしかけ



➤ 一般家庭を対象とした情報提供

- 米国の電力会社Opowerによる大規模実証実験
- 近隣住民との消費電力量の比較情報を一般家庭向けに送信し、住宅の消費電力量を約2%削減



公共空間での実証例は少ない

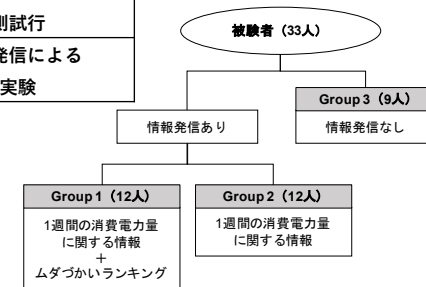
- 光熱費を払う責任がなく、Free-to-useの認識がある
- 省エネ行動が経済的利益に直接影響せず、経済的なインセンティブが効きにくい

情報提供実験

➤ 実験概要

- ✓ 場所 : 大学の研究生室
- ✓ 被験者 : 33名の学生
- ✓ 期間 : 3ヶ月
- ✓ 情報提供 : 消費電力量と在席状況に関する情報 週1回の頻度で提供
- ✓ グループ分け : グループ1、2は実験群 (情報あり) グループ3は対照群 (情報なし)

実験期間	実験内容
10/29 ~ 11/21	消費電力量と在席状況の計測試行
11/22 ~ 01/20	週間情報発信による対照実験



➤ 計測項目

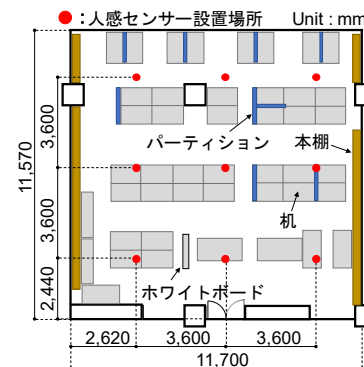
- ✓ 個人の機器消費電力量 : 1時間毎の消費電力量
- ✓ 個人の在席状況 : 10秒毎の放射温度



電源タップ

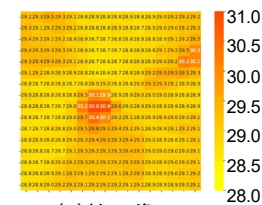


人感センサ

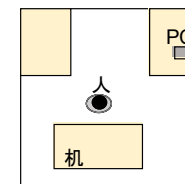


➤ 在席判断アルゴリズム

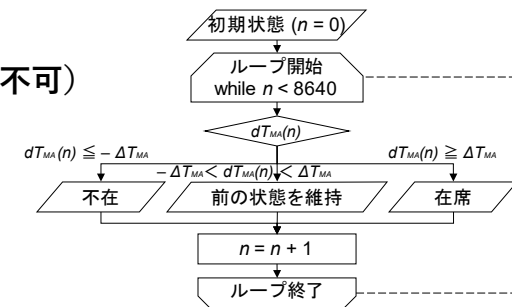
- ✓ 人感センサのデータから在/不在を判断 (デフォルト機能では特定個人の在席状況判断不可)



(a)熱画像



(b)イメージ

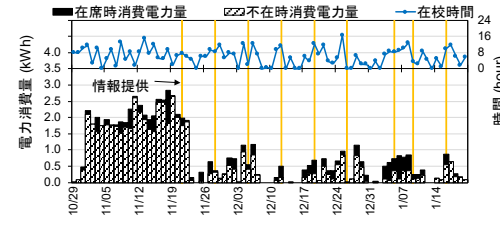




実験結果

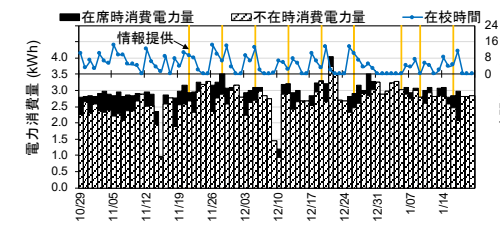
個別分析

✓ 効果があった例(被験者29)



最初の情報提供後、不在時消費電力量の顕著な削減効果が見られた。

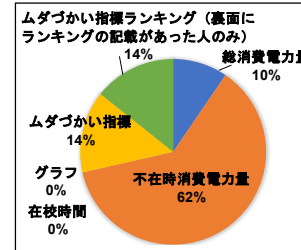
✓ 効果がなかった例(被験者27)



全被験者の中で最も不在時消費電力量が大きい。情報提供後もその値は減少しなかった。

アンケート調査

省エネ行動を誘発した情報



主観的認識と実際の電力使用状況

「省エネのために行動を変えたか」に対する回答	E_{total}/T_{school}	
	削減	増加
はい	7	5
いいえ	4	6

省エネルギー効果

総消費電力量 E_{total}
在校時間 T_{school} → 情報提供前後で比較

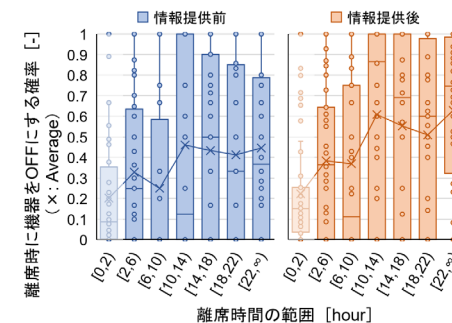
	情報提供の有無	情報提供前 [Wh/min]	情報提供後 [Wh/min]	変化率 [-]
Group 1	○	2.91	3.07	+0.055
Group 1 (被験者27を除いた場合)	(ランキング: 有)	2.26	1.94	-0.141
Group 2	○	1.80	1.63	-0.090
Group 3	×	2.27	2.47	+0.089

情報を与えたグループ1と2の指標の変化率は情報を与えなかった対象群グループ3の変化率より小さい。(統計的な有意差は確認できなかった)

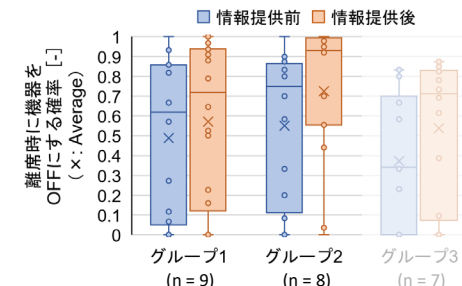
省エネルギー行動生起確率の分析

省エネ行動生起確率 (離席時に機器をOFFにする確率) = $\frac{\text{離席時に機器をOFFにした回数}}{\text{離席した回数}}$

✓ 離席時間と省エネルギー行動生起確率の関係

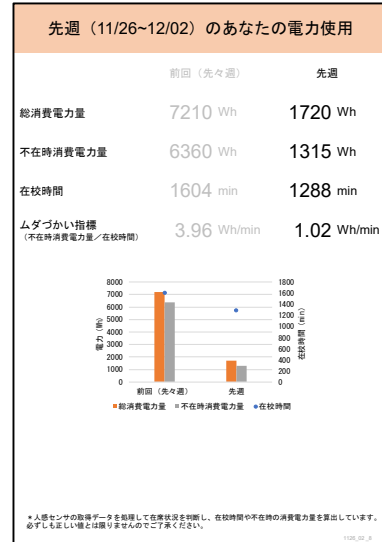


✓ グループ別の省エネルギー行動生起確率

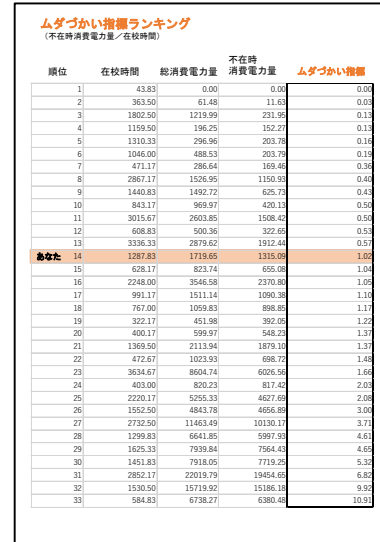


情報提供方法

✓ おもて面



✓ うら面(Group 1のみ)



✓ 不在時消費電力量

$$E_{non-occupied} = E_{total} \times \frac{t_{non-occupied}}{t_{occupied} + t_{non-occupied}}$$

E_{total}	: 総消費電力量
$E_{non-occupied}$	: 不在時消費電力量
$t_{occupied}$	: 在席時間
$t_{non-occupied}$	: 不在時間

✓ ムダづかい指標

$$I_{wasting} = \frac{E_{non-occupied}}{t_{school}} \left(\begin{array}{l} I_{wasting} : \text{ムダづかい指標} \\ T_{school} : \text{在校時間} \end{array} \right)$$



③休憩による生産性向上と省エネルギー照明システム

研究目的

効果的な休憩による生産性向上と、休憩時に省エネルギー化を実現する照明システムについて検証する

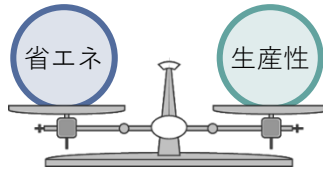
研究背景

省エネルギー

- 日本政府は2030年までに業務部門における温室効果ガスの排出量を2013年度比40%減を目標^[1]

生産性向上

- 東日本大震災直後の節電時期において、節電前よりも生産性が平均6.6%低下^[2]

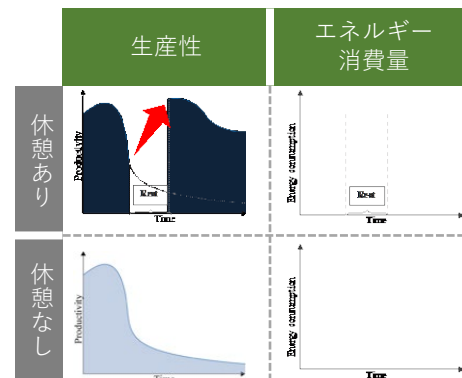


省エネと生産性向上を同時に達成可能なシステムが必要

提案手法

作業者に適切なタイミングで休憩を行ってもらう

- 休憩を行うことで生産性が向上
- 休憩などの作業者の状態に応じた機器制御を行うこと消費電力を削減
- 生産性向上により総作業が減少し、消費電力を削減



生産性向上実験

実験目的 | 休憩により生産性が向上することを示す

実験概要 | 休憩の有無で認知タスクの成績の推移を見る

- ◇ 被験者 | 学生4名
- ◇ 認知タスク | 2-backタスク
- ◇ 実験時間 | 2500秒
- ◇ 休憩時間 | 5分

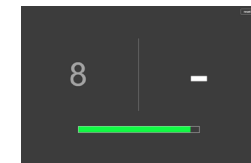


図. 2-backタスクの画面

2-backタスク

- ◇ 生産性の高い状態をワーキングメモリの高い状態と定義
- ◇ ワーキングメモリの測定に使用される2-backタスクを採用^[3]
- ◇ 1秒毎に表示される1桁の数字を記憶し、2個前の数字を回答する

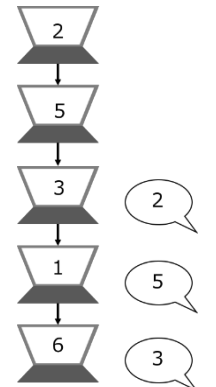


図. 2-backタスクの流れ

実験条件と手順

実験条件

- 条件A: 実験開始後1000秒で休憩
- 条件B: 実験開始後1500秒で休憩
- 条件C: 休憩なし

- ◇ 全ての条件においてタスクを行う時間は2200秒で等しい

- ◇ 各被験者は3条件を日にちを分け2回ずつ合計6回の実験を行う

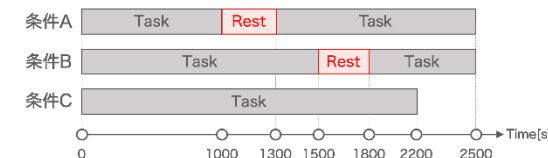


図. 各実験条件

[1] Ministry of the Environment. (2016). 地球温暖化対策計画. Retrieved 6 12, 2018, from <https://www.env.go.jp/press/files/jp/102816.pdf>

[2] Tanabe, S. I., Iwahashi, Y., Tsushima, S., & Nishihara, N. (2013). Thermal comfort and productivity in offices under mandatory electricity savings after the Great East Japan earthquake. Architectural Science Review, 56(1), 4–13. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.744296>

[3] Y. Nakao, A. Kodabashi, M. Yarita, T. Fujimoto, and T. Tamura. Working Memory Load Related Modulations of the Oscillatory Brain Activity : n-back ERD/ERS Study. 生体医工学, Vol. 49, No. 6, pp. 850–857, 2011.



実験結果

➤ 効果のあった例 (subject3)

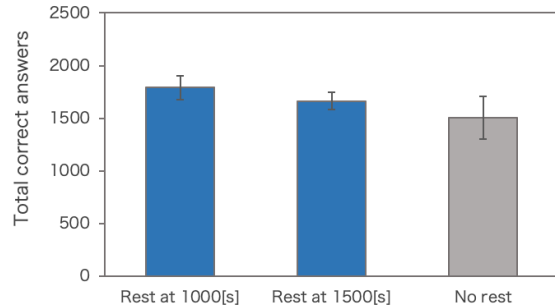


図. 各条件における総正解数

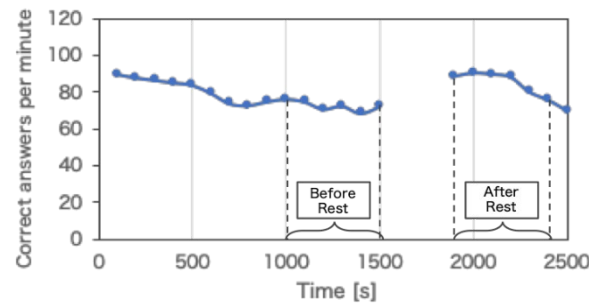


図. 条件Bにおける正解数の時刻歴

- 休憩なしの条件と比較して、休憩あり条件の方がタスクの総正解数が多い
→ 生産性が高い

- 休憩によりタスクの正解数の低下が止まり、休憩後に正解数が向上する

➤ 効果のなかった例 (subject2)

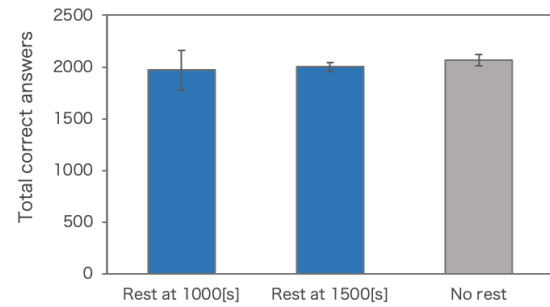


図. 各条件における総正解数

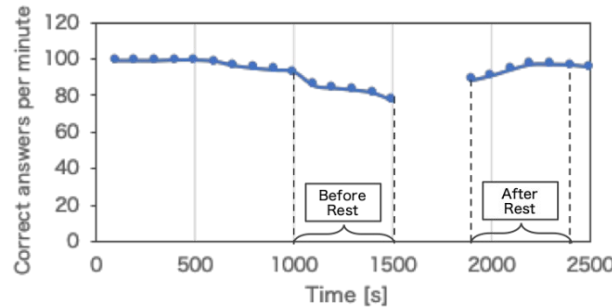


図. 条件Bにおける正解数の時刻歴

- 休憩ありの条件と比較して、休憩なし条件の方がタスクの総正解数が多い
→ 生産性が低い

- 休憩によりタスクの正解数の低下が止まり、休憩後に正解数が向上する

被験者により休憩の効果の有効性は異なるため、さらに被験者を増やす必要がある

照明システム

➤ 行動認識システム

- ◇ 作業者の休憩時の離席を検知し、タスク照明を制御

➤ 昼光利用システム

- ◇ 昼の日光の光量に合わせ、アンビエント照明を制御

システムの実装

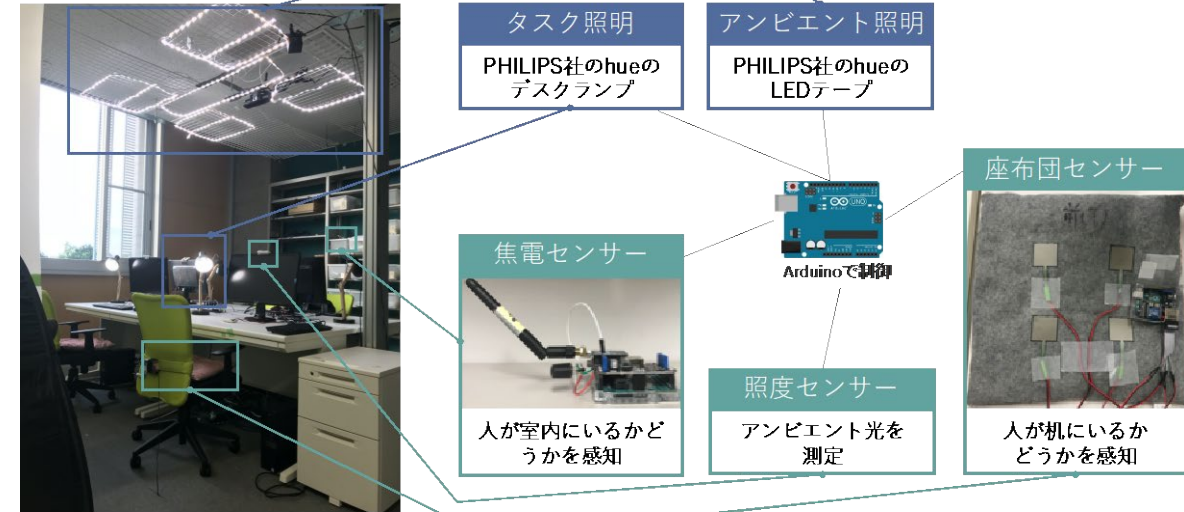
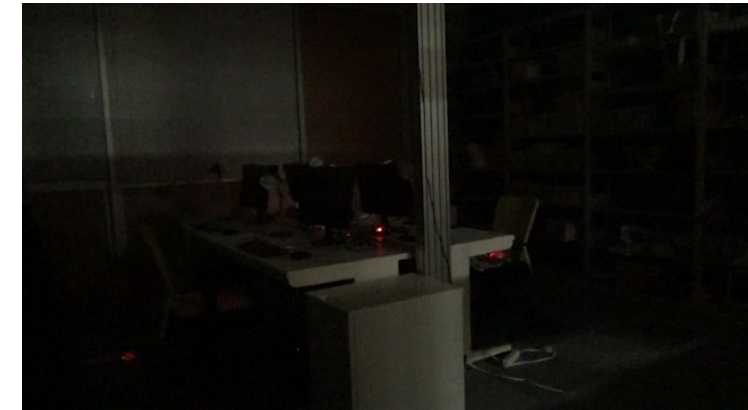


図. 実装に用いたセンサとアクチュエータ

	アンビエント照明	タスク照明
Working	on	on
Idling	on	off
Away	off	off

図. 行動認識システムの制御則

- 行動認識システムはon/off制御
- 昼光利用システムはPID制御を行う
- 今後、実際にこのシステム下で消費エネルギーについての検証を行う



動画. 照明制御の様子 (2 倍速)



④蓄熱槽を有する熱源システムの低炭素制御

研究目的

熱源システムにおける調整力（蓄熱槽）を活用することで二酸化炭素排出量を最小化する制御をシミュレーションを用いて検証する

研究背景

➤ パリ協定に代表される脱炭素化の重要性

➤ 再生可能エネルギー普及による弊害

- ・ 出力変動
- ・ 需給バランスの乱れ（逆潮流など）
- ・ ダックカーブ

➤ 需要家視点のデマンドレスポンス（DR）

- ・ 現在はDRの要請が電源側から出されているが、需要家側が常に電力供給側の状況を参照して機器制御することで、居住者への負荷を最小限に抑えながらDR量の最大化が可能となる

九電 きょう太陽光制御



日本経済新聞、2018年
10月13日朝刊5ページ

➡ 電力供給側の状況として動的な排出係数を参照し、二酸化炭素排出量が最小となるような機器制御を行った

- ✓ Carbon Activated Demand Response（CADR）と呼ぶ
- ✓ 動的排出係数の推定、シミュレーションによる機器制御状態の算出、モデル予測制御による最適化を行った

動的排出係数

➤ 1時間ごとの発電量あたりのCO2排出量 [kg-CO2/kWh]

- ・ 排出係数は年間平均値が事業者ごとに公開されている
- ・ 再生可能エネルギーによる時刻変動が考慮するために、九州電力管内のデータから1時間ごとの排出係数を推定した

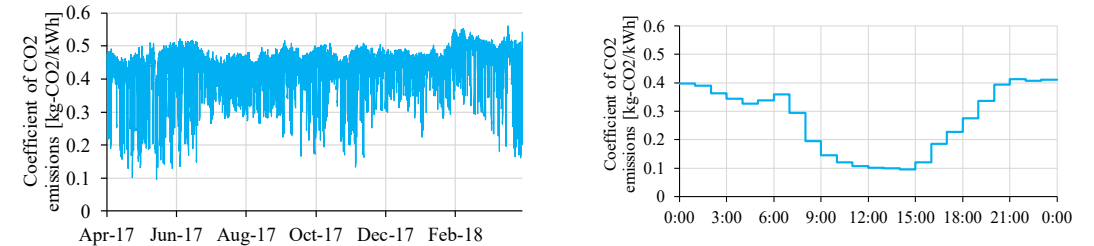


図. 動的排出係数（左：2017年度、右：最小値を記録した一日）

対象システム

➤ オフィスビルに設置された実在する熱源システム

- ・ 冷凍機3台（約2,500RT）、蓄熱槽（約6,000m³）を有する
- ・ 入力とする熱負荷や下水温度は実測値を利用した
- ・ 本システムを対象に詳細なシステムシミュレーションを構築した

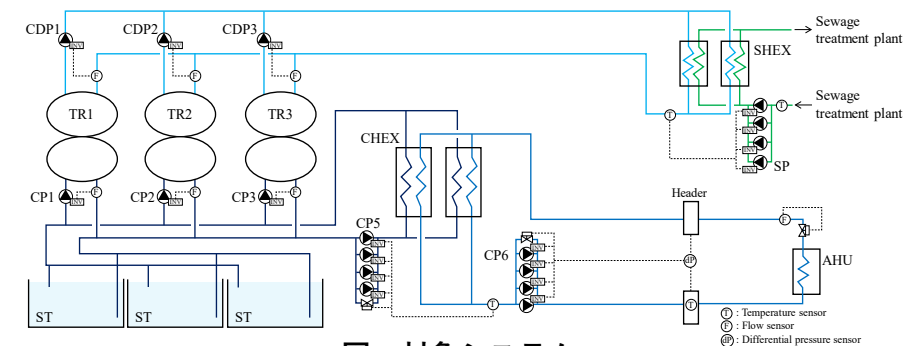
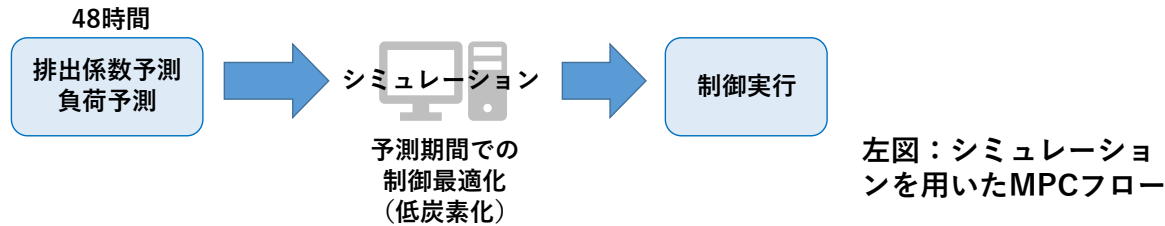


図. 対象システム

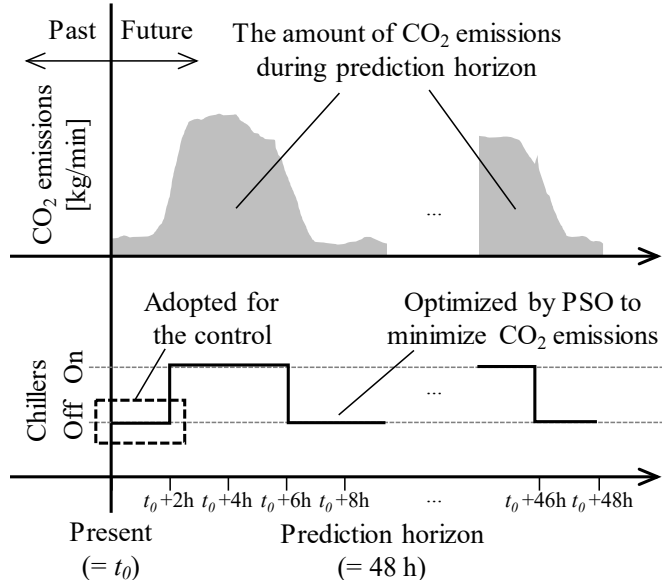


モデル予測制御 (Model Predictive Control, MPC)

- 排出係数が小さい時間帯に蓄熱を行い、排出係数が高い時間帯に放熱を行う。負荷と排出係数の予測値に基づき、二酸化炭素排出量を最小化する熱源システムの機器制御を行った



- システムの予測挙動に基づき次時刻の制御入力を決定した



- ・ 制御対象：冷凍機のON/OFF
- ・ 予測期間：48時間
- ・ 評価関数：将来48時間の二酸化炭素排出量
- ・ 制御周期：2時間
- ・ 最適化器：Particle Swarm Optimization (PSO)

- 送水温度の上昇といった制御不全が生じないよう制約条件を与えた

図. MPCイメージ：CO₂排出量に基づいて冷凍機の発停を決定した

ケーススタディー：6月の1週間を対象とした試算

- 従来制御（夜間蓄熱）に対して、提案手法（CADR）は29%の削減効果が得られた。
 - ・ 排出係数が小さい時間帯に冷凍機が稼働し、排出係数が高い時間帯に放熱されていることが確認された
 - ・ 対象週は6月であるため年間の中でも排出係数の変動が大きい
 - ・ 熱源システムは建築物全体における消費電力量の約3割を占める
 - ・ 以上を踏まえると、CADRによる年間のCO₂排出量削減効果は5~10%と想定される

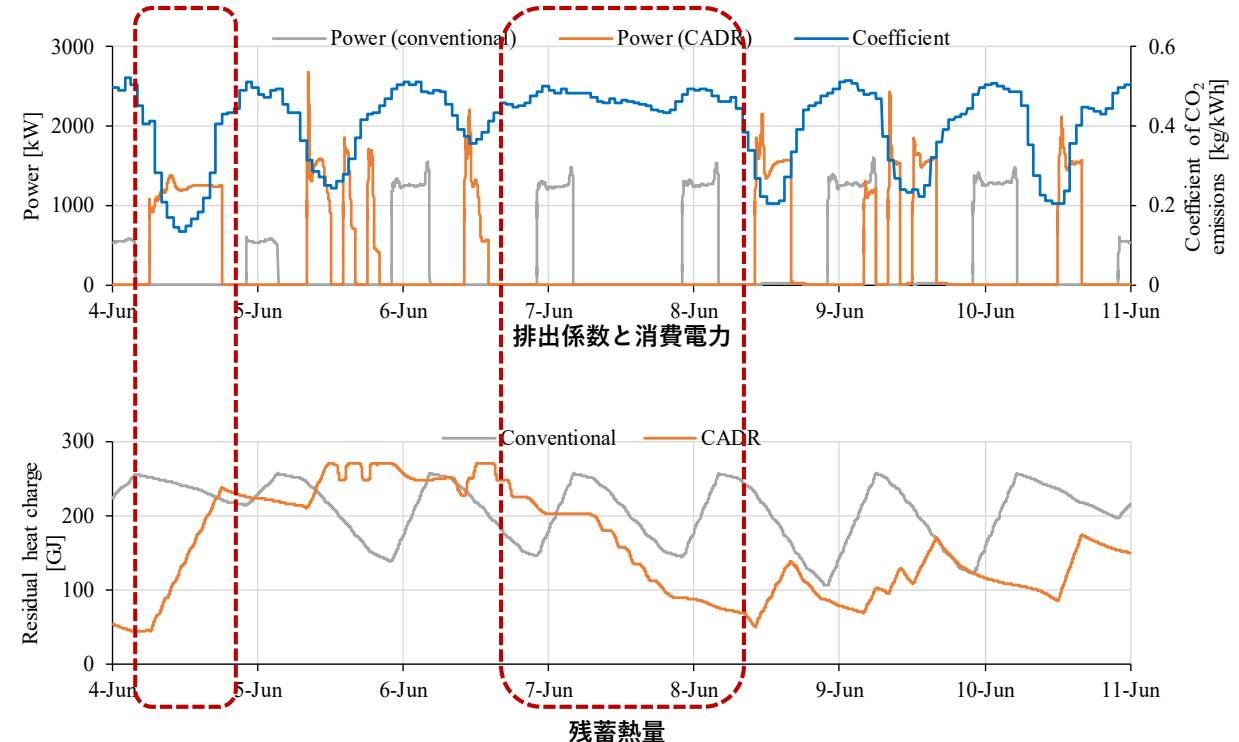


図. 代表週におけるCADRと従来制御（夜間蓄熱）の比較

関連する発表論文

- ✓ Shohei MIYATA, Yasuhiro KUWAHARA, Yasunori AKASHI, Jongyeon LIM, Weijie ZHANG, Naoki YOSHIMOTO, Model Predictive Control of Chillers with Heat Storage Tanks as a Carbon Activated Demand Response, The 2nd International Conference of IASUR, VII-3, Xi'an China, 2019.03
- ✓ 宮田翔平, 桑原康浩, 赤司泰義, 林鍾衍, 吉本尚起, 動的二酸化炭素排出係数を考慮した熱源システムの低炭素制御, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, 第9巻, pp.97-100, 2019年9月