

J124

工場の空調に及ぼす熱負荷と その低減

【発表要旨】 生産を伴う工場において、空調負荷によるエネルギー消費量の低減の必要性は大きいですが、個別熱源への対応、また、工場建築物の構造への配慮など、エネルギーを削減するための方向性について、配慮すべき項目が多い。そこで、実際の工場における実情をモデルに反映したシミュレーションを実施し、空調負荷低減のための方策について検討したので、報告する。

伝正 *○ 小林 敬幸(名大), 鈴木 省吾, 大倉 重信 (ハイデック)

温度成層型空調システム 1

● 温度成層型空調システムの説明

- ・ 工場や体育館といった高天井大空間への空調のために開発された空調方式
- ・ 人間の活動する高さの範囲を基準として空調領域と非空調領域を区分する
- ・ 高温の空気は上昇しやすいため、床付近に低温の空気を送る
- ・ 非空調領域(天井や吹き出し口の上側など)に排気孔を設置することで自然換気

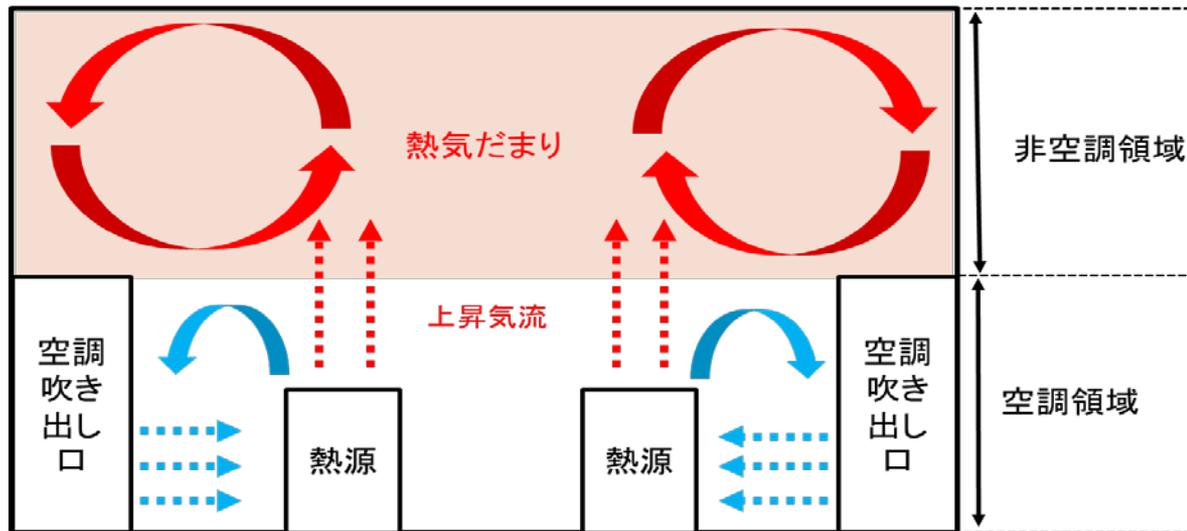


図 温度成層型空調システムのイメージ

換気熱量

- 換気熱量：流出口から換気によって排出される熱量と定義

$$\text{換気熱量} = \text{比熱}[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \times \text{密度}[\text{kg}/\text{m}^3] \times \text{換気量}[\text{m}^3/\text{s}] \times \text{温度差}[\text{K}] \times 3600[\text{s}]$$

- ・ 物質収支から、流入量 = 換気量

$$\text{流入量は } 1\text{m} \times 1\text{m} \times 3 \times 1\text{m/s} = \underline{3\text{m}^3/\text{s}} \text{ が換気量となる}$$

- ・ 密度や比熱の算出に用いる温度は換気部の表面平均温度を使用

密度

比熱

$$\rho = \frac{351.99}{T} + \frac{344.84}{T^2}$$

ρ : 密度[kg/m^3]、 T : 温度[K]

$$C_p = 1030.5 - 0.19975T + 3.9734 \times 10^{-4}T^2$$

C_p : 比熱[J/kg K]、 T : 温度[K]

※1気圧、乾き空気の物性値（温度範囲：200～400K）

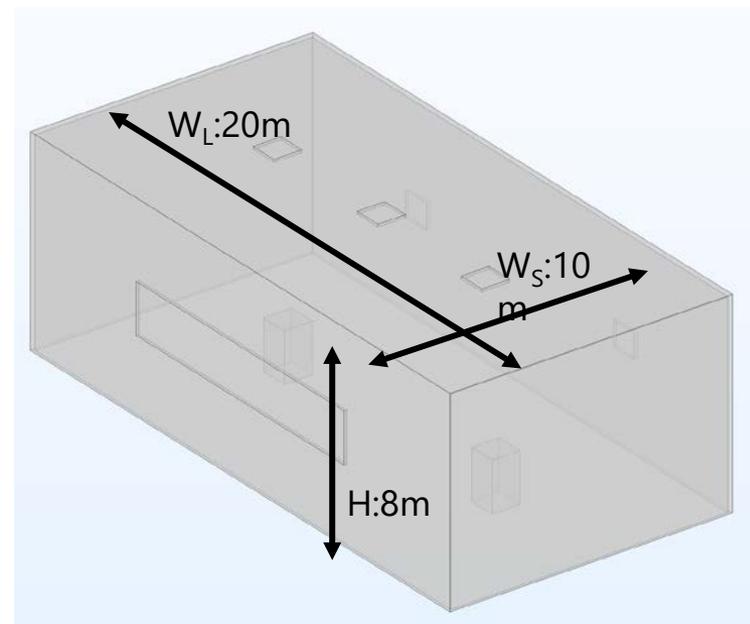
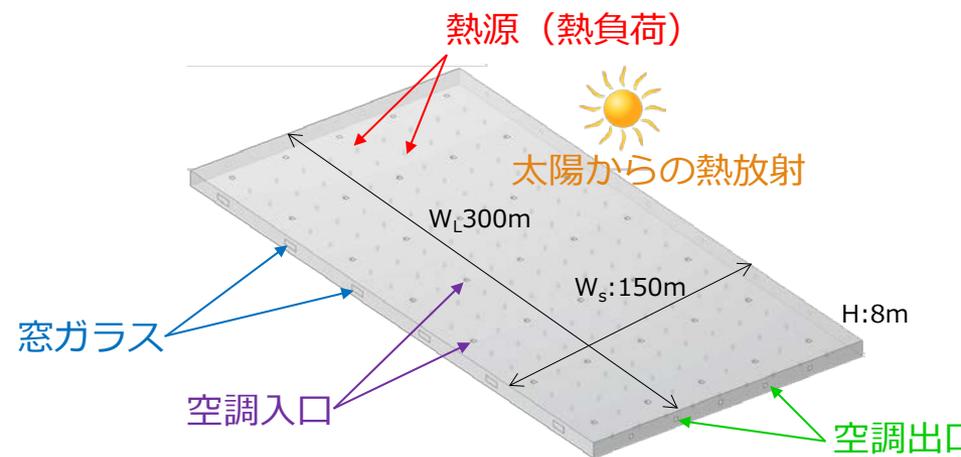
参考文献：McQuillan, F. J.; Culham, J.R.; Yovanovich, M.M. Properties of Dry Air at One Atmosphere. Microelectronics Heat Transfer Lab, 1984

温度成層型空調システム 小工場モデル1

●シミュレーション条件 設計

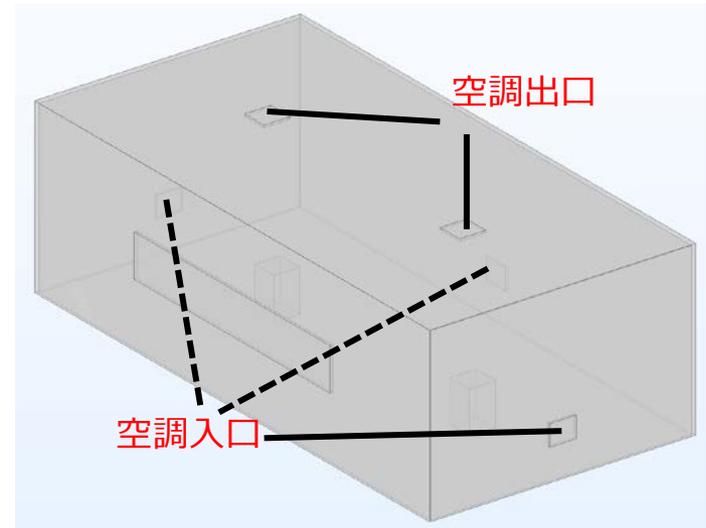
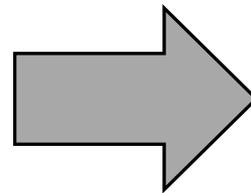
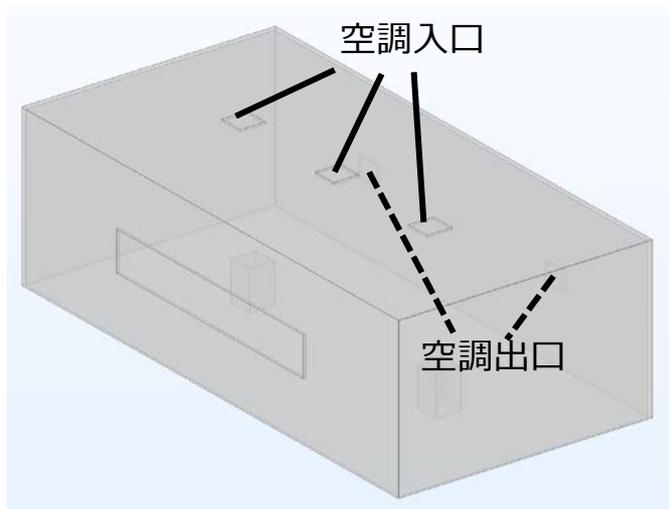
- ・幅20m、奥行10m、高さ8m
 - ・熱源：5kWの機械2基
 - ・流入口：1m*1m 部屋上部に3つ設置
 - ・流出口：1m*1m 部屋背面に2つ設置
 - ・窓ガラス：2.5m*10m 部屋正面に設置
 - ・流入温度15°C(※)、流入速度1m/s
- 初期室温20°C、外部温度35°C(夏場想定)
- ・太陽からの熱放射 最大で900W/m²
 - ・壁の熱伝達率 10W/(m²・K)
 - ・壁の熱伝導率 1.8W/(m・K)
 - ・壁の輻射率 内外共に0.85

※条件による変更有り



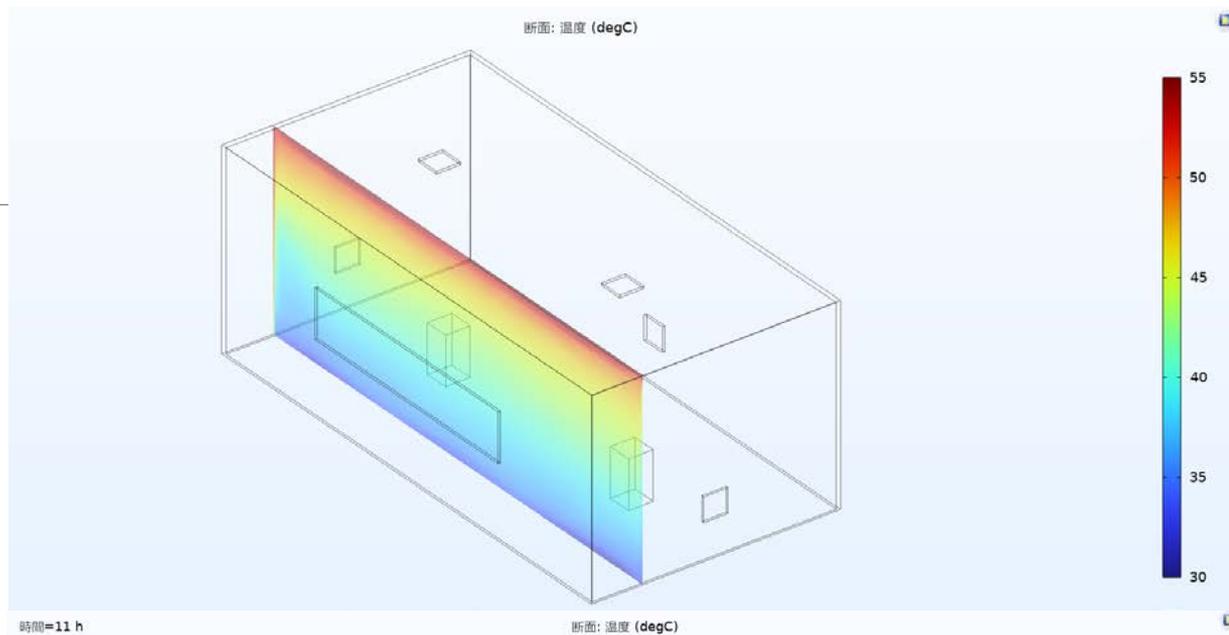
温度成層型空調システム 小工場モデル2

- 比較のため、基本的な条件は既存のものと同じ
- 上部に設置していた流入口を床から高さ1.5mの場所へ移動
(東、西、北側の壁に1つずつ設置)
- 北側の壁に設置していた流出口を上部へ移動



小工場モデル温度分布 1

全体

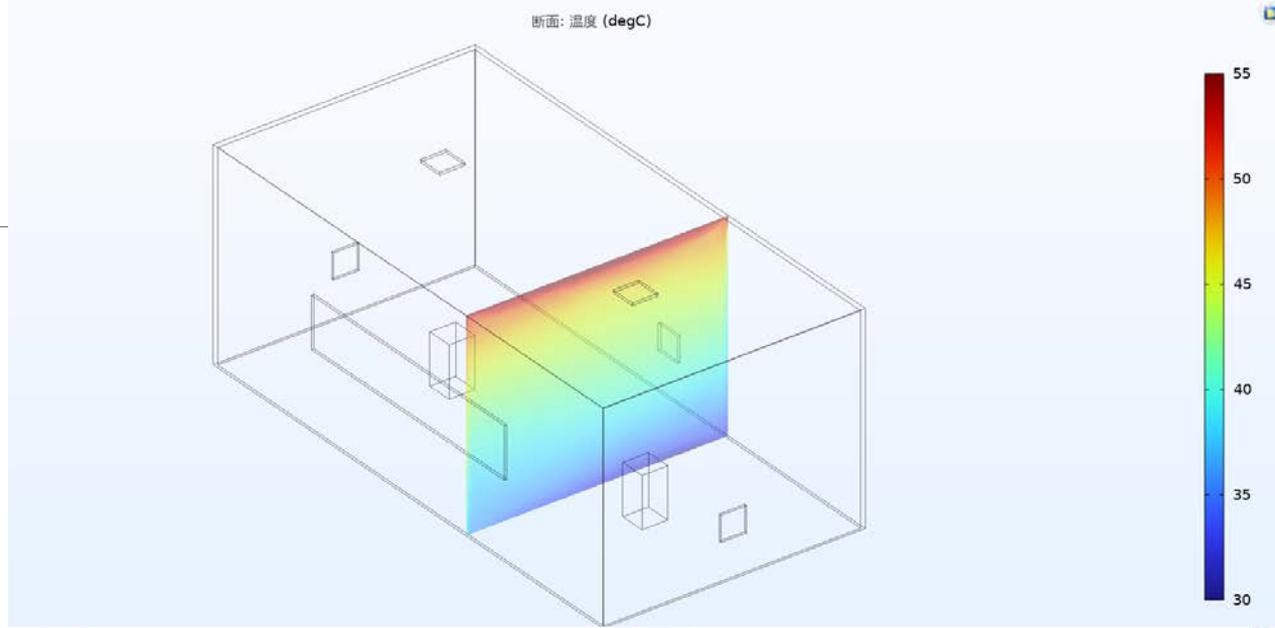


横から

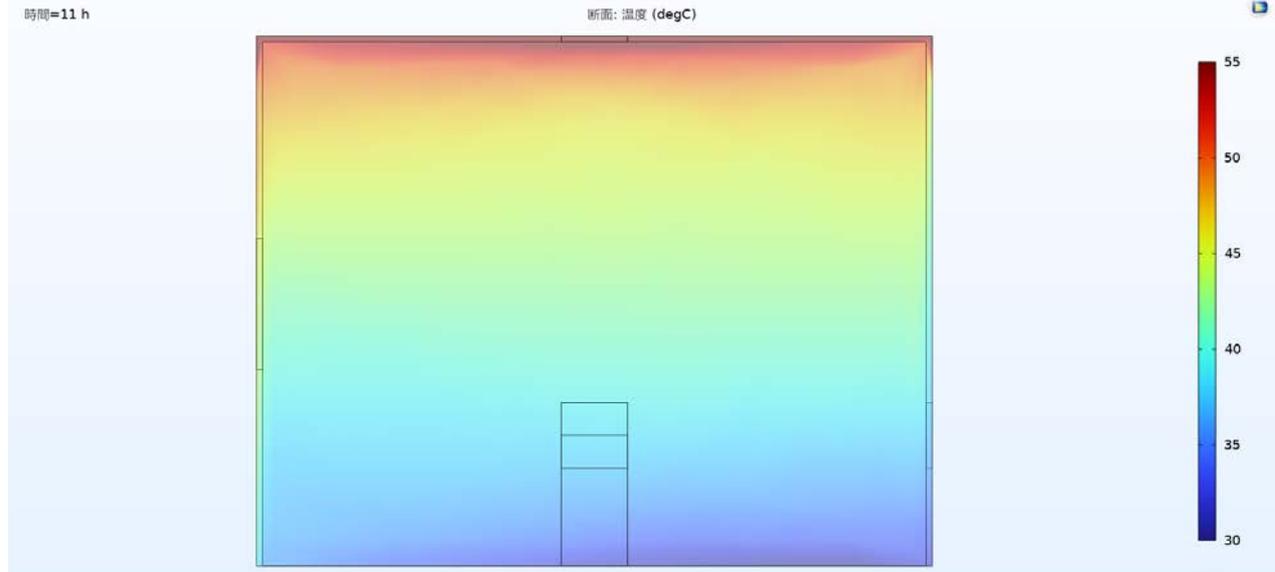


小工場モデル温度分布 2

全体



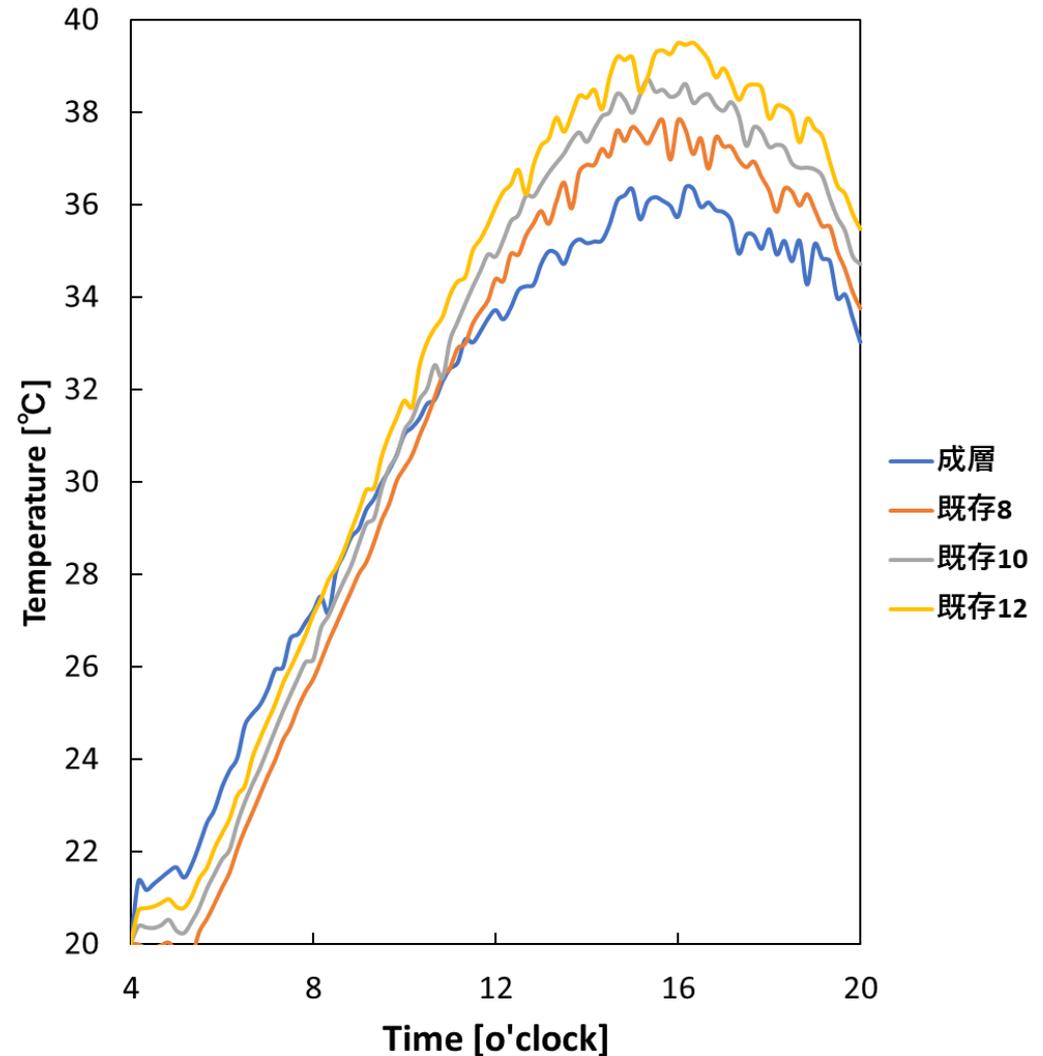
横から



温度成層型空調システム 小工場モデル3

シミュレーション結果 1

- ・ 温度成層空調システムを導入することで空調温度を7度下げ以上の効果がある
導入前8°C > 導入後15°C
- ・ 成層空調導入後の空調温度を20°Cにして再計算



温度成層型空調システム 小工場モデル4

シミュレーション結果2

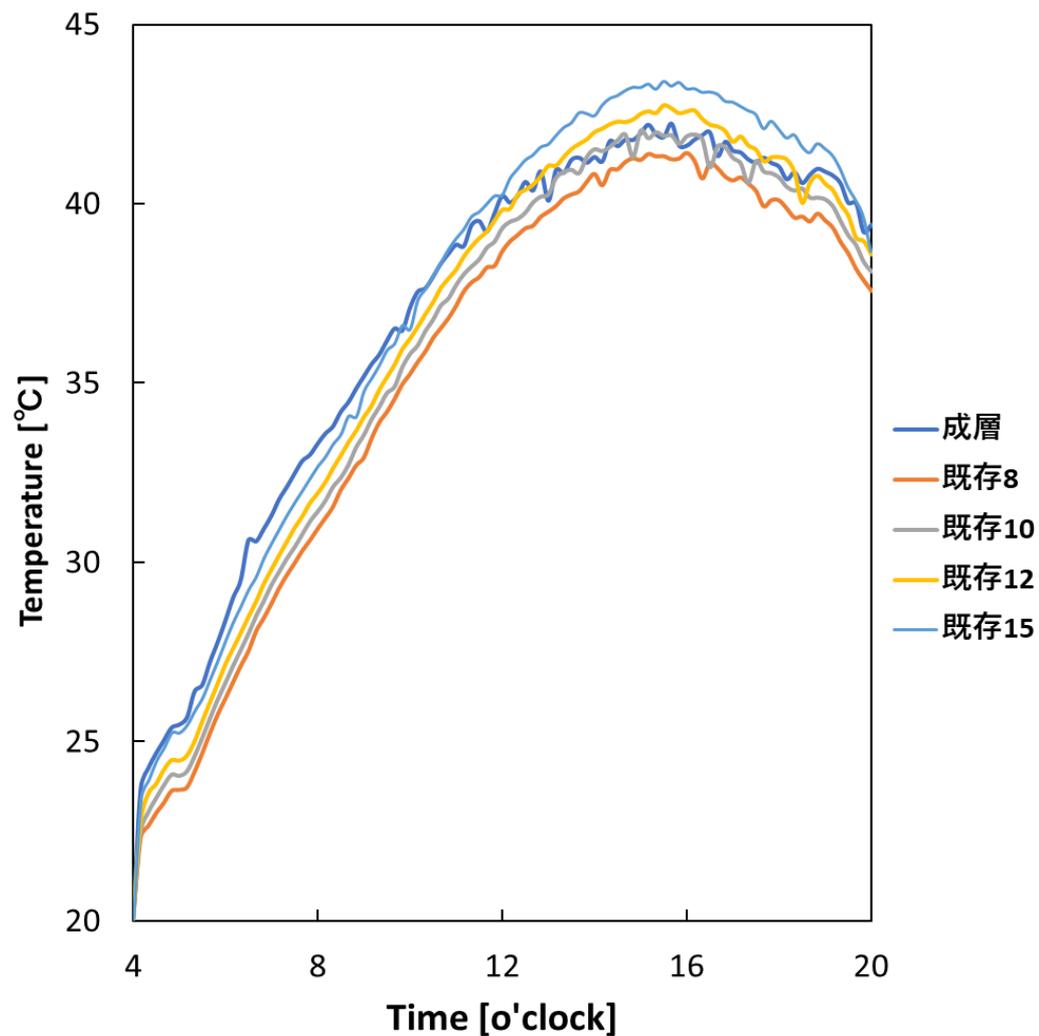
- ・ 流入温度を
成層空調：20°C
既存：8,10,12,15°Cで計算

- ・ 導入前10°Cと導入後20°Cで
平均温度がほぼ一致

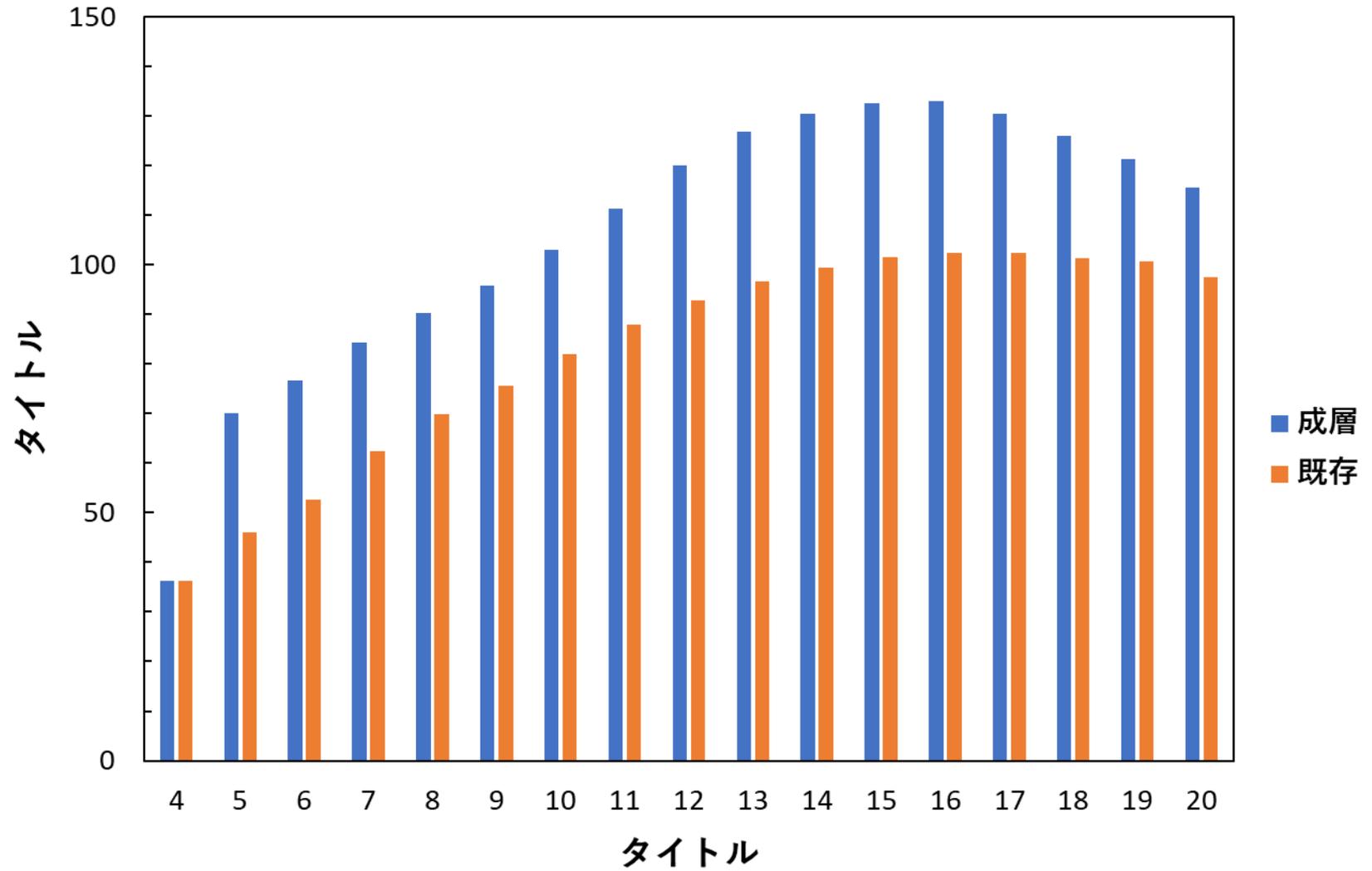
- ・ 空調温度の差が10°Cの場合の
電力量の差を算出

$$\begin{aligned} & 3[\text{m}^3/\text{s}] * 1.25[\text{kg}/\text{m}^3] \\ & * 1.00[\text{kJ}/(\text{kg K})] * 10[\text{K}] \\ & = 37.5[\text{kW}] \end{aligned}$$

冷房の成績係数を5と仮定すると
電力は7.5kWの差が生じる



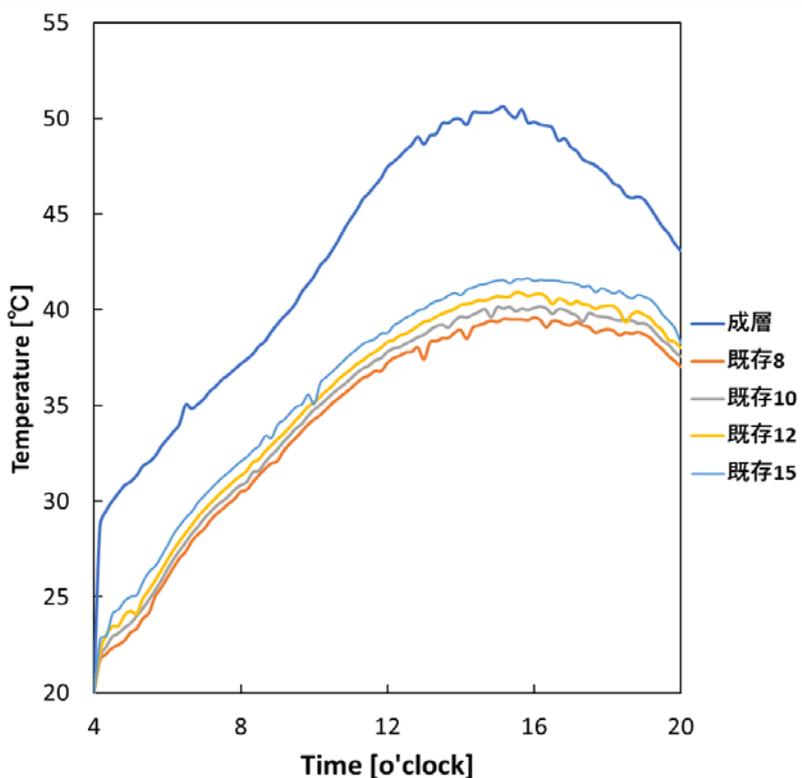
小工場 換気熱量



温度成層型空調システム 小工場モデル5

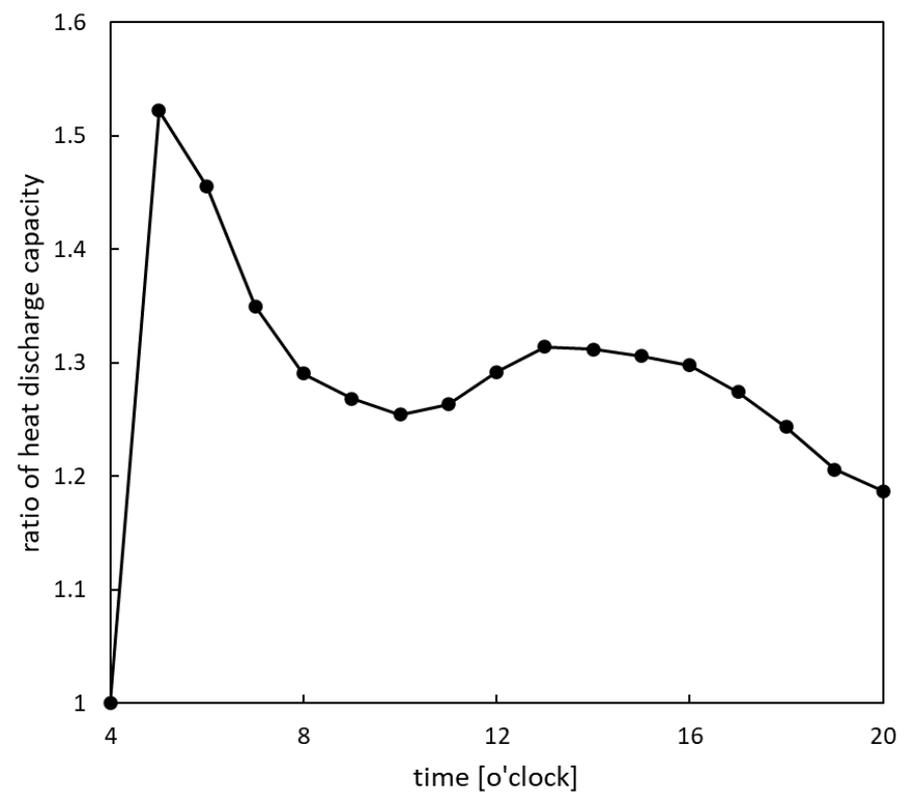
・換気部温度

成層空調採用後の方が流入温度が高いため差が大きくなっている



・換気熱量の比

(成層空調/既存10°C)
換気熱量は30%程度の増加



大工場モデル 換気熱量 1

- ☀ 輻射 (表面-表面) (rad)
 - ▢ 拡散面 1
 - ▢ 初期値 1
 - 不透明度 1
 - 不透明度 2
 - ☀ 外部輻射源 1
- 📦 伝熱 (固体および流体) (ht)
 - ▢ 固体 1
 - ▢ 流体 1
 - ▢ 初期値 壁
 - ▢ 断熱 1
 - ▢ 初期値 流体
 - ▢ 初期値 固体
 - ▢ 流入 1
 - ▢ 流出 1
 - 表面-外気輻射 1
 - ▢ 境界熱源 1
 - ▢ 熱流束 窓
 - ▢ 熱流束 壁
- 🌊 層流 (spf)
 - ▢ 流体特性 1
 - ▢ 初期値 1
 - ▢ 壁 1
 - ▢ 体積力 1
 - 📦 圧力ポイント拘束 1
 - ▢ 流入口 1
 - ▢ 流出口 1

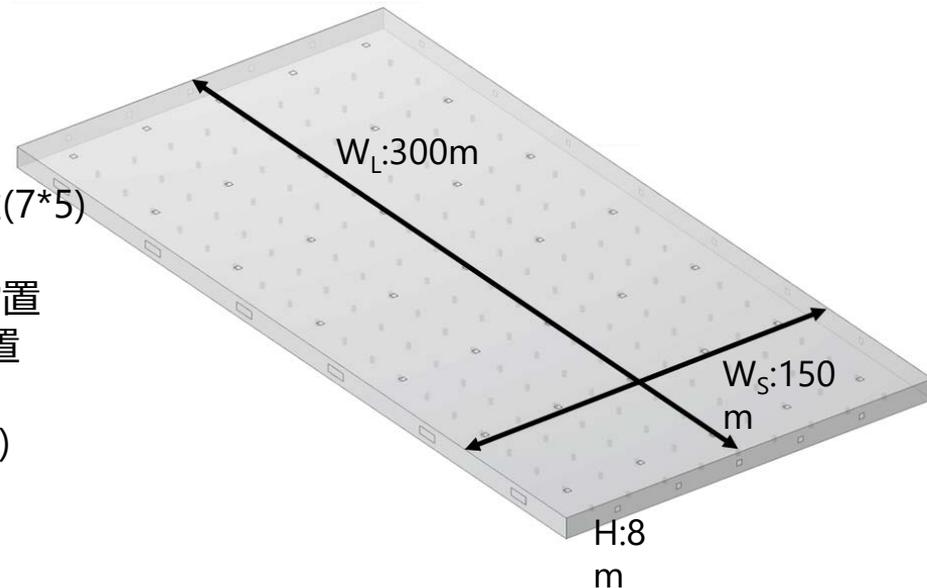
● シミュレーション条件

- **大きな工場**を模したモデルに壁の厚み(0.1m)を追加
- 湿度は考慮していない

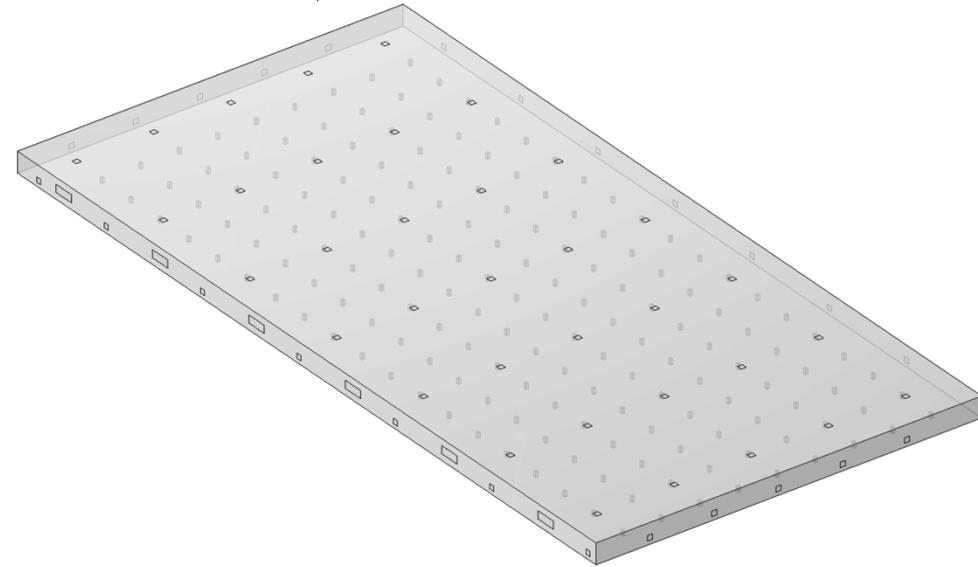
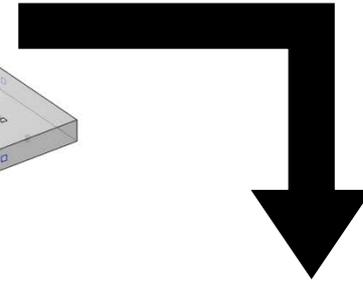
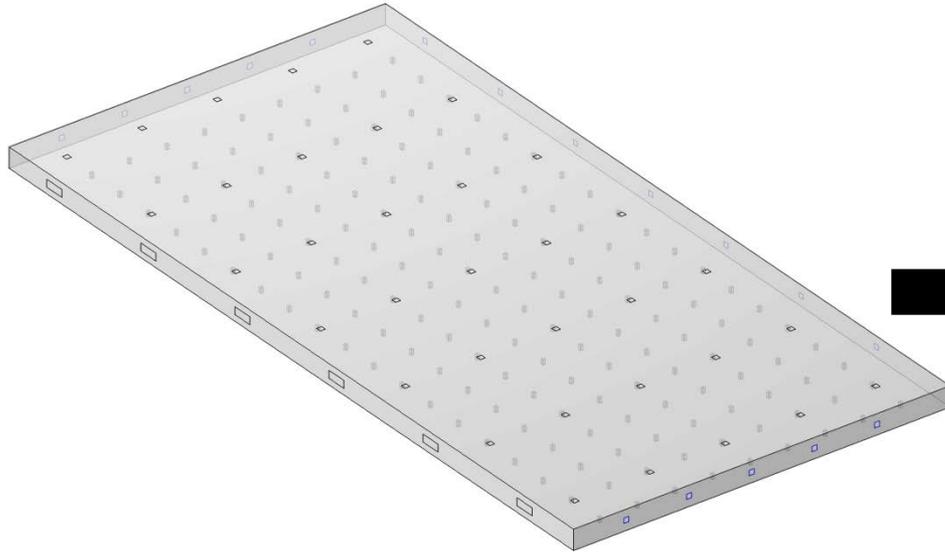
設計

- **幅300m、奥行150m、高さ8m**
- 熱源：5kWの機械171基(19*9)
- 流入口：2m*2m 部屋上部に35個設置(7*5)
- 流出口：2m*2m 東西の壁に5つずつ、北の壁に7つ設置
- 窓ガラス：3m*8m 部屋正面に6つ設置
- 流入温度15°C、流入速度3m/s
- 初期室温20°C、外部温度35°C(夏場想定)
- 太陽からの熱放射 最大で900W/m²
- 壁の熱伝達率 10W/(m²・K)
- 壁の熱伝導率 1.8W/(m・K)
- 壁の輻射率 内外共に0.85

※空調無しの場合は、冷房のみ停止し、送風有り



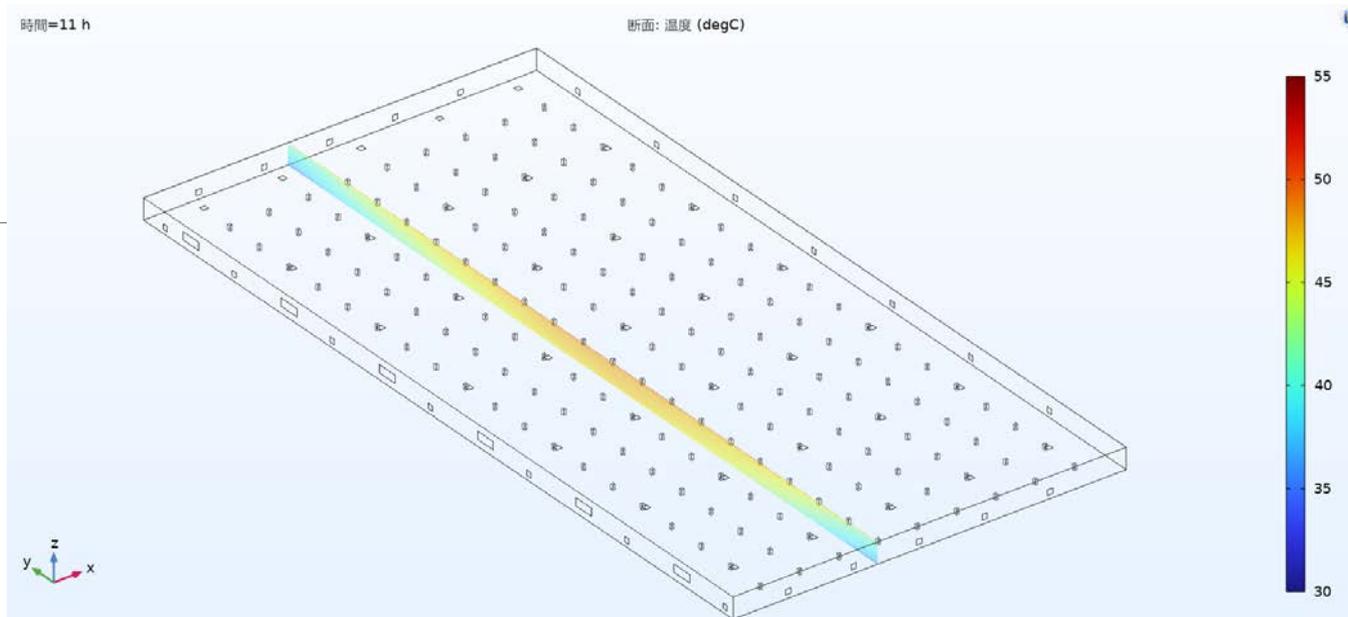
温度成層型空調システム 大工場モデル1



- ・ 流入口の設置数
導入前：35個(天井に設置)
導入後：24個(東西南北の壁に設置)
※体積流入量を導入前後で 140m^3 とするため流入速度を調整
導入前は 1m/s 導入後は
 $1 \times 35 / 24 = \underline{1.458\text{m/s}}$

大工場モデル温度分布 1

全体

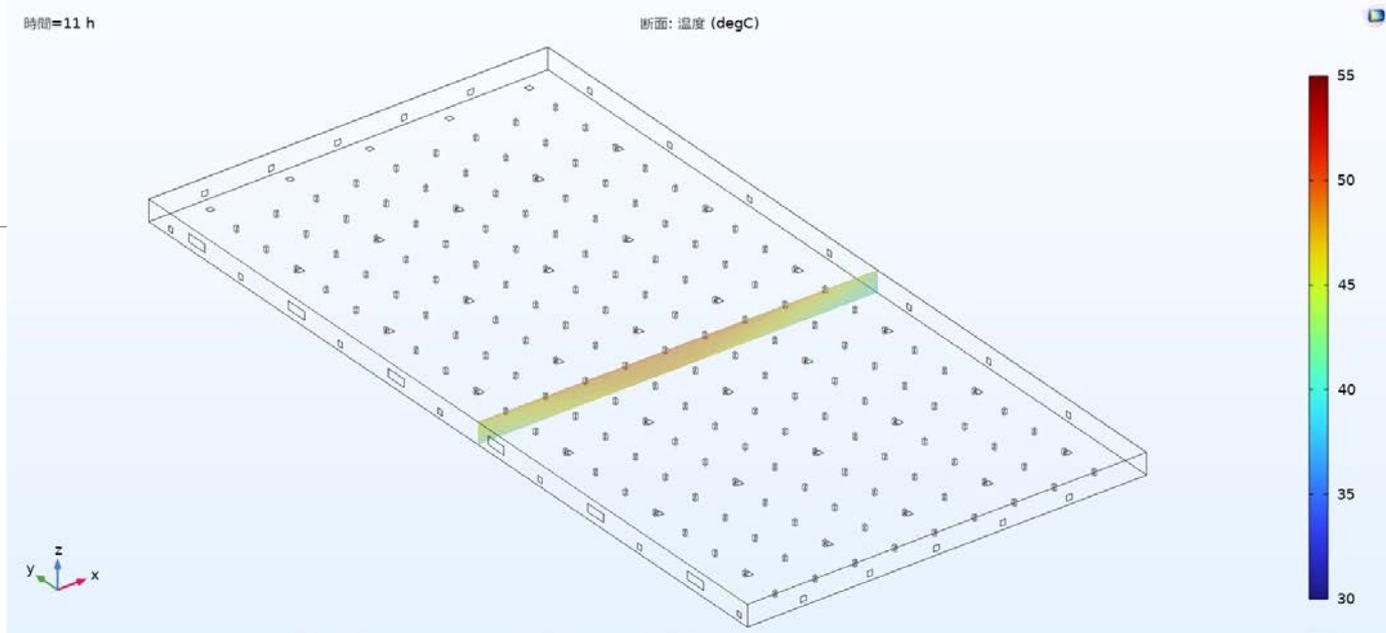


横から



大工場モデル温度分布 2

全体



横から



温度成層型空調システム 大工場モデル2

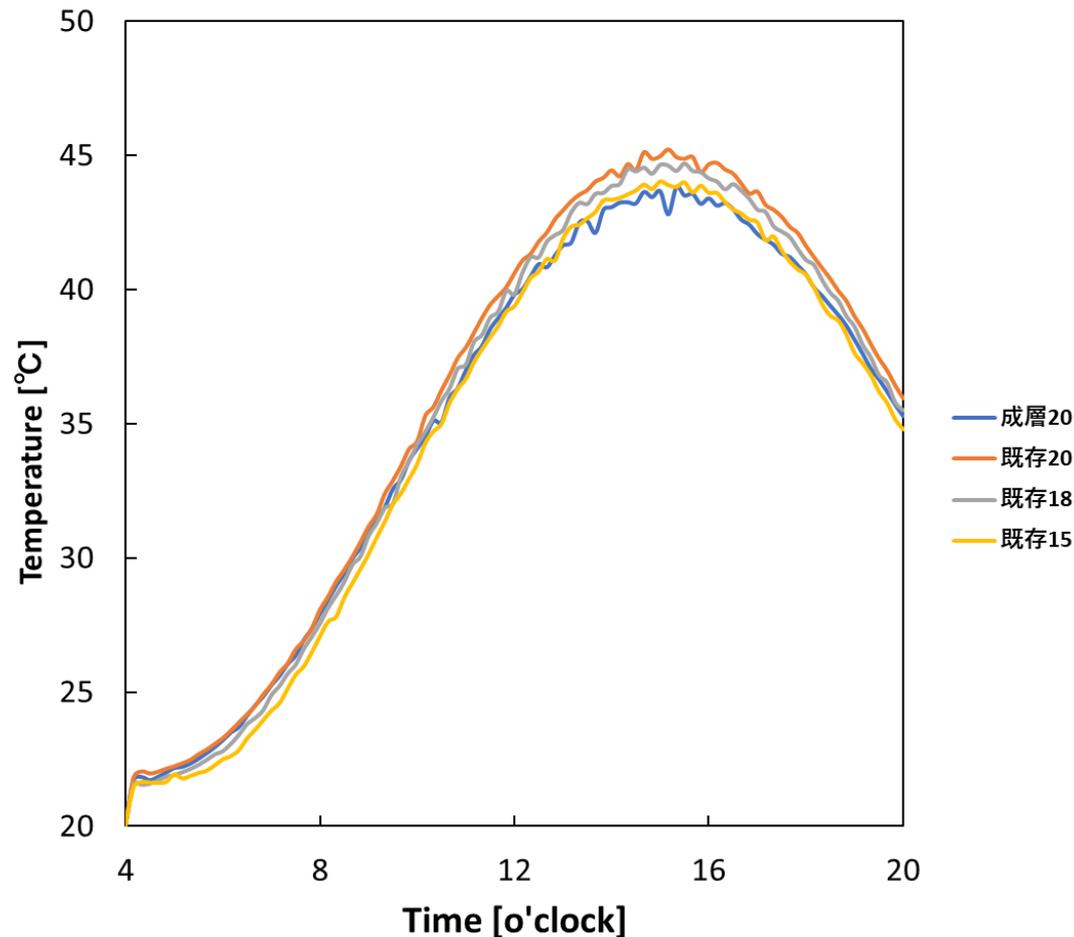
- ・小工場モデルと同様、成層空調導入の場合は流入温度を20°C、既存のモデルにおいては流入温度を20,18,15°Cの3パターンで計算

- ・導入後の20°Cと導入前の15°Cがほぼ一致

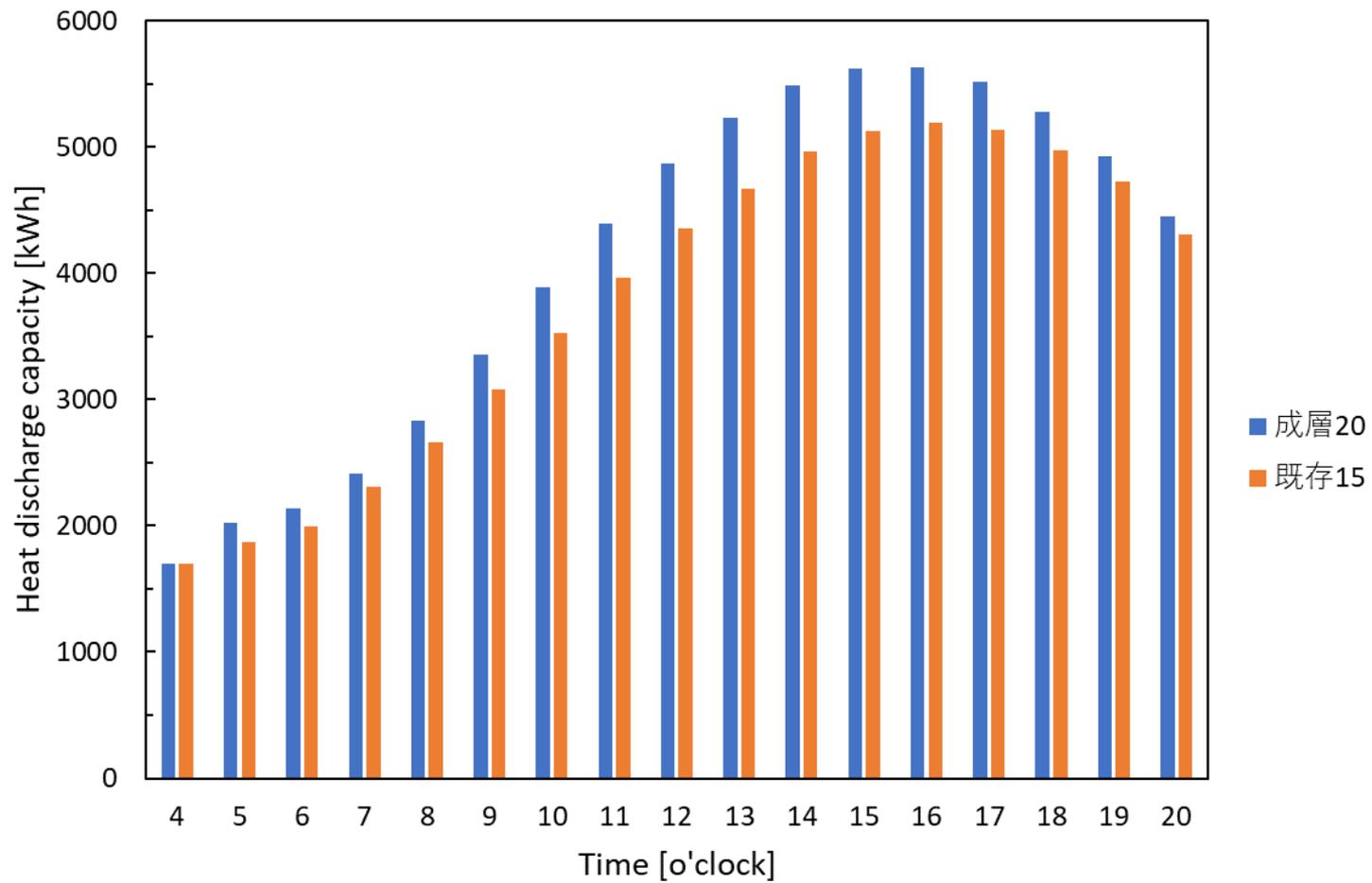
空調温度の差が5°Cの場合の電力量の差を算出

$$\begin{aligned} &140[\text{m}^3/\text{s}] * 1.25[\text{kg}/\text{m}^3] \\ &* 1.00[\text{kJ}/(\text{kg K})] * 5[\text{K}] \\ &= 875[\text{kW}] \end{aligned}$$

冷房の成績係数を5と仮定すると電力は175kWの差が生じる



大工場 換気熱量



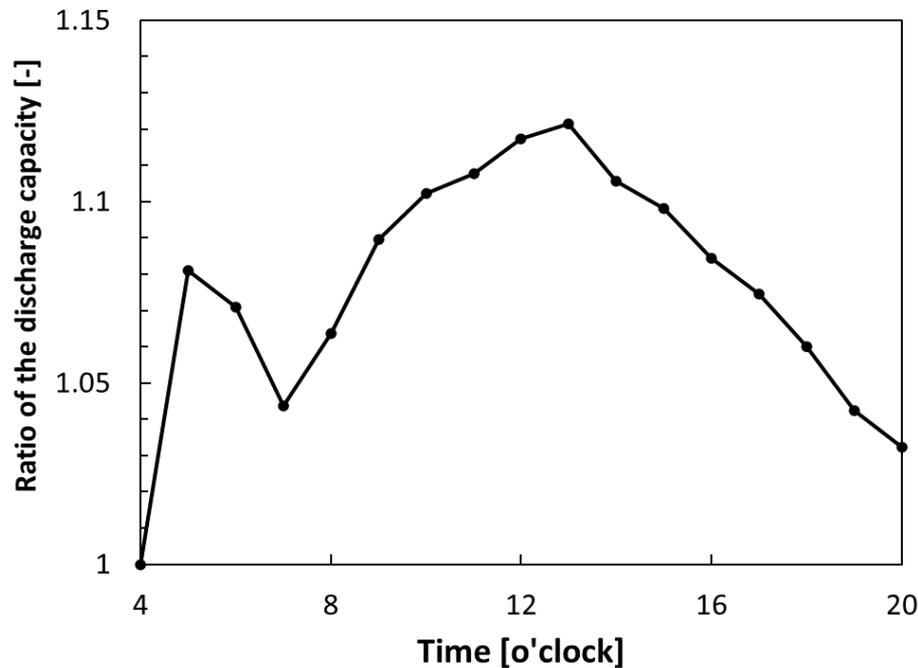
温度成層型空調システム

大工場モデル3

- 換気熱量の比

(成層空調20/既存15)

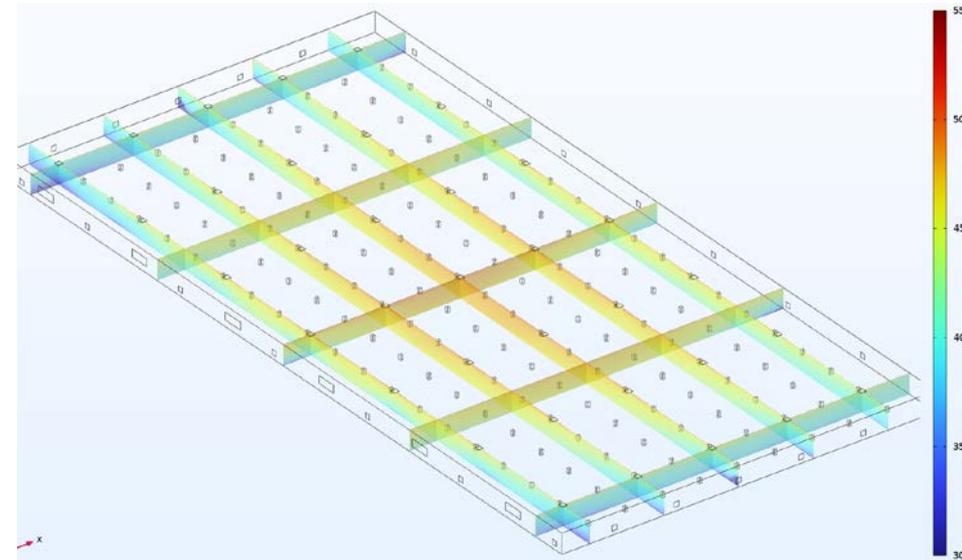
小工場モデルでは成層空調を導入することで30%増加していたが、大工場モデルでは最大でも12%程度と、増加幅が小さくなっている



- 断面の温度分布図

南側の壁にも流入口を追加したが、モデル中央は周りと比べると温度が高くなっている

➡壁だけでなく、モデル中央にも送風口を設置するなどの改善が必要



以上