



全空間 CFD でわかったこと

体育館の空調は 何 W/m^2 必要か

断熱で必要能力はどこまで下がるか。そして、容量だけでは決まらないこと。

ZEB 株式会社

ZEB 株式会社 2026 年 8 月

本資料は実在の建物を参照した検討を、建物名・所在地・機器型式を伏せてモデル建物として一般化したものです。

© 2026 ZEB 株式会社



本日の問い

「体育館にエアコンを入れる」とき、
私たちは何を決めているのか。

必要能力（ W/m^2 ）。断熱。換気。そして — 何時に点けるか。
この四つは、独立に決められません。

整備は加速している

31.7%

体育館等の空調設置率
(令和 8 年 5 月 1 日現在)

33.1%

避難所指定の体育館等

令和 17 年度

設置率 100% の政府目標

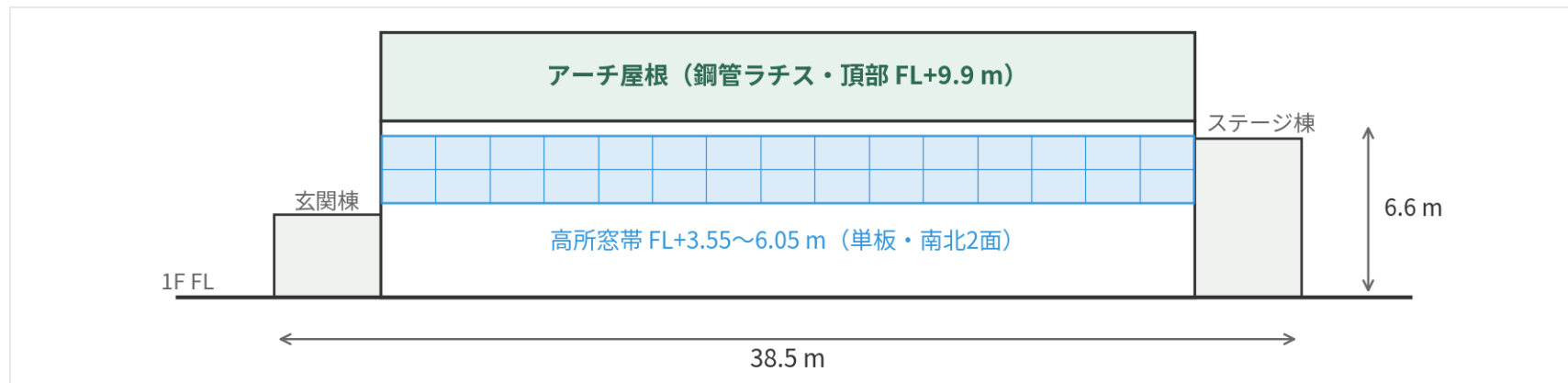
同じ建物に、要求の違う二つの機能が同時に求められている

授業で使う「屋内運動場」は、朝 2 時間で立ち上がるかが問われる。

災害時に人が滞在する「避難施設」は、20 年に一度の猛暑で保てるかが問われる。

📄 検討した建物

1976 年（昭和 51 年）竣工の中学校 屋内運動場。RC 造＋鋼管ラチスのアーチ屋根。



アリーナ

$23.0 \times 30.5 \text{ m} = 701.5 \text{ m}^2$

気積

約 $6,400 \text{ m}^3$ （等価高さ
約 9.1 m）

外皮面積

$1,559.7 \text{ m}^2$ （床面積比
2.22）

開口部

高所窓 152.1 m^2 （単
板）

判定は「床の高さ」で行う



室平均では判断できない

天井まで約 10m。空気は上下に分かれます。室平均や吹出口の近くの温度では、実際に人がいる場所の状態がわかりません。空調機は左右の長い壁ぎわに置いた床置形で、前面の上部から吹き出します。

判定面は床上 1.0 m ・ アリーナ居住域の面平均。

冷房 28℃ 以下 / 暖房 19℃ 以上。立上りは 8:00 ON → 10:00 までに達成。

≡ 検討した 9 つのケース

無断熱の現状（①）から段階的に強化した 9 仕様。以降のグラフは番号と呼び名で示します。

ケース	呼び名（本資料）	屋根	窓	外壁	換気	U 屋根	U 壁	U 窓
①	現状	断熱なし	既存単板	断熱なし	換気扇	1.86	2.32	6.40
②	屋根 50	断熱 50mm	現状	現状	換気扇	0.36	2.32	6.40
③	屋根 100	断熱 100mm	現状	現状	換気扇	0.20	2.32	6.40
④	屋根 50 + 窓	断熱 50mm	内窓追加	現状	換気扇	0.36	2.32	1.32
⑤	屋根 100 + 窓	断熱 100mm	内窓追加	現状	換気扇	0.20	2.32	1.32
⑥	+ 外壁 50	断熱 50mm	内窓追加	外断熱 50mm	換気扇	0.36	0.55	1.32
⑦	+ 外壁 100	断熱 100mm	内窓追加	外断熱 100mm	換気扇	0.20	0.32	1.32
⑧	+ 熱交換	断熱 100mm	内窓追加	外断熱 100mm	全熱交換	0.20	0.32	1.32
⑨	+ 窓削減	断熱 100mm	内窓 + 窓面積削減	外断熱 100mm	全熱交換	0.20	0.32	1.32

U 値の単位 $W/(m^2 \cdot K)$ 。全熱交換のエンタルピー交換効率 60%。②～⑨は前段の仕様に積み上げています。

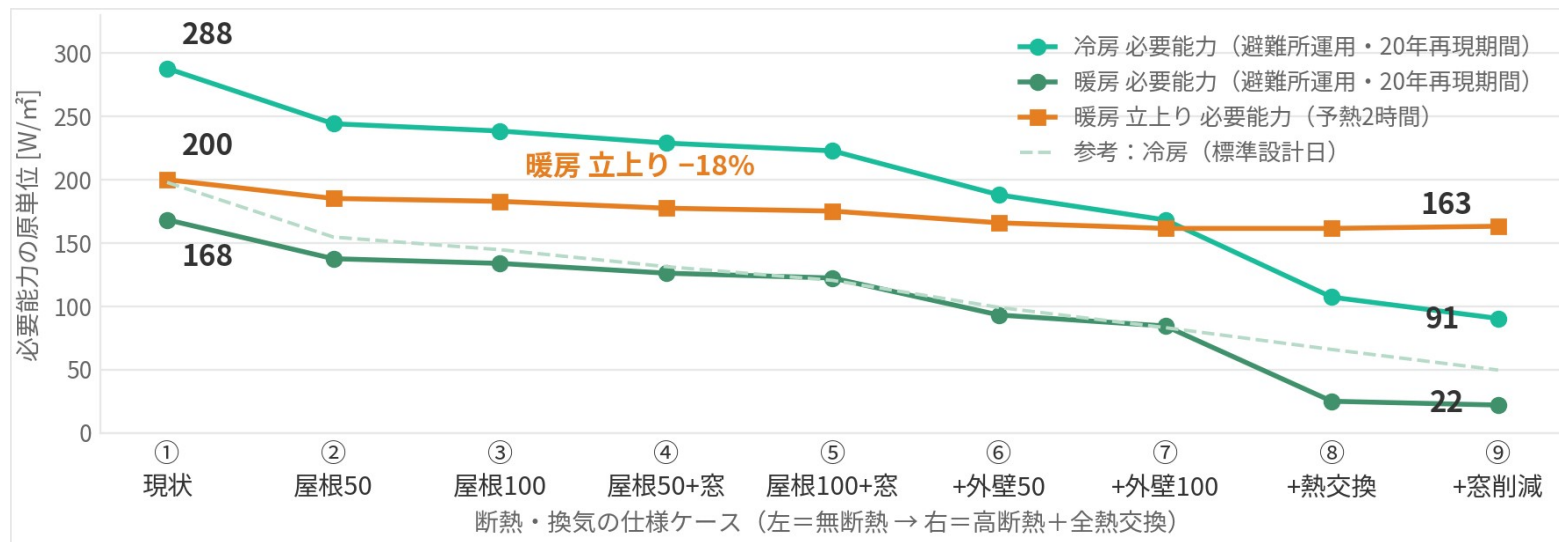


本題（１）

断熱で、必要能力は
どこまで下がるか。

床面積あたりの必要能力を W/m^2 で押さえます。

断熱仕様別の必要能力 [W/ m²]



冷房は 1/3 まで下がる。暖房の立上りは 8 割にしかない

冷房 288 → 91 W/ m² (−68%)、暖房の維持 168 → 22 W/ m² (−87%)。一方、朝に室温を持ち上げる能力は 200 → 163 W/ m² (−18%) にとどまります。

≡ 必要能力の原単位 一覧 [W/ m²]

ケース	冷房 標準日	冷房 20 年	暖房維持 標準日	暖房維持 20 年	暖房立上り 予熱 2h	暖房立上り 予熱 3h	暖房立上り 予熱 4h	選定定格 冷房	選定定格 暖房
①	198	288	133	168	200	179	167	319	359
②	155	244	108	138	185	163	150	279	314
③	145	239	105	134	183	161	147	255	285
④	131	229	99	126	178	155	141	255	285
⑤	121	223	96	122	175	153	139	255	285
⑥	99	188	72	93	166	143	128	224	249
⑦	83	168	65	85	162	139	124	192	214
⑧	66	107	16	25	162	139	124	128	143
⑨	50	91	14	22	163	140	125	128	143

表の読み方

アリーナ床面積 701.5 m² 当たり。冷房は維持が、暖房は立上りが決定側。⑧⑨は暖房定格 143 W/ m² に対し予熱 2 時間の必要能力 162 W/ m² が上回る。

◎ 断熱グレード別の設計めやす [W/ m²]

避難施設としての運用（在館 250 人・換気 7,500 m³/h）を 20 年再現期間で見た場合の目安です。

現状のまま （無断熱）

冷房 約 290 W/ m²
暖房 維持 約 170 W/ m²
暖房 立上り 約 200 W/ m²

冷房が決定側。立上りには余裕がある。

屋根断熱＋内窓 （ケース⑤相当）

冷房 約 220 W/ m²
暖房 維持 約 120 W/ m²
暖房 立上り 約 175 W/ m²

冷房が決定側のまま。

高断熱＋全熱交換 （ケース⑧⑨相当）

冷房 約 90 ～ 110 W/ m²
暖房 維持 約 20 ～ 25 W/ m²
暖房 立上り 約 160 W/ m²

立上りが決定側になる。

読み方

断熱を強めるほど「冷房で決まる」から「暖房の立上りで決まる」へ主導権が移ります。高断熱を選ぶなら、機器容量ではなく予熱の運用で成立させる設計になります。

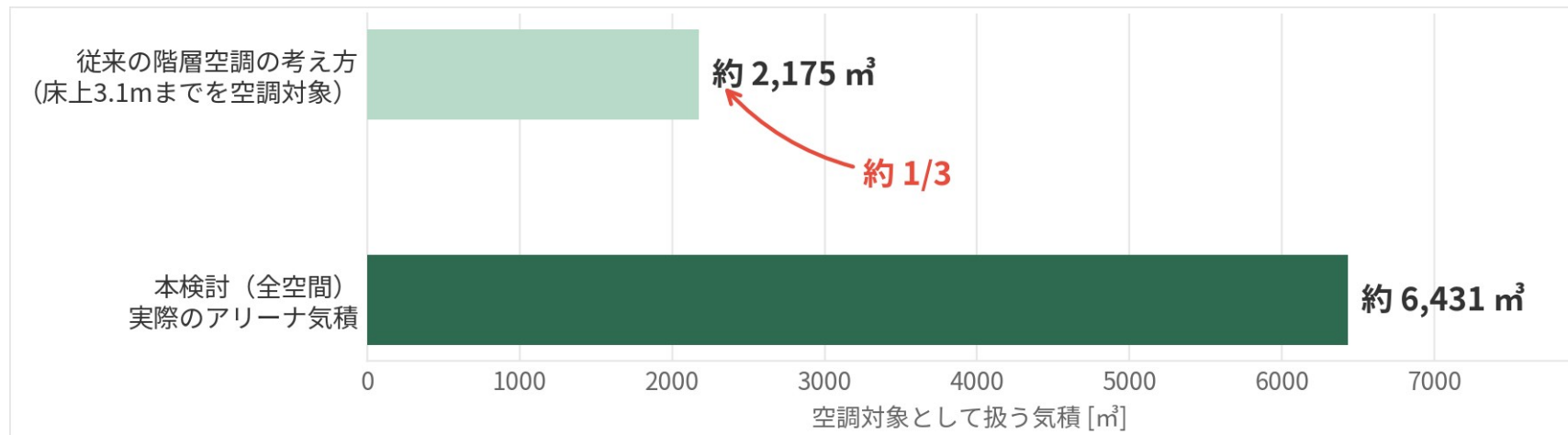


本題（２）

容量だけでは決まらない、
4つの落とし穴。

気積の扱い・極値条件・予熱時間・平均室温という近似。

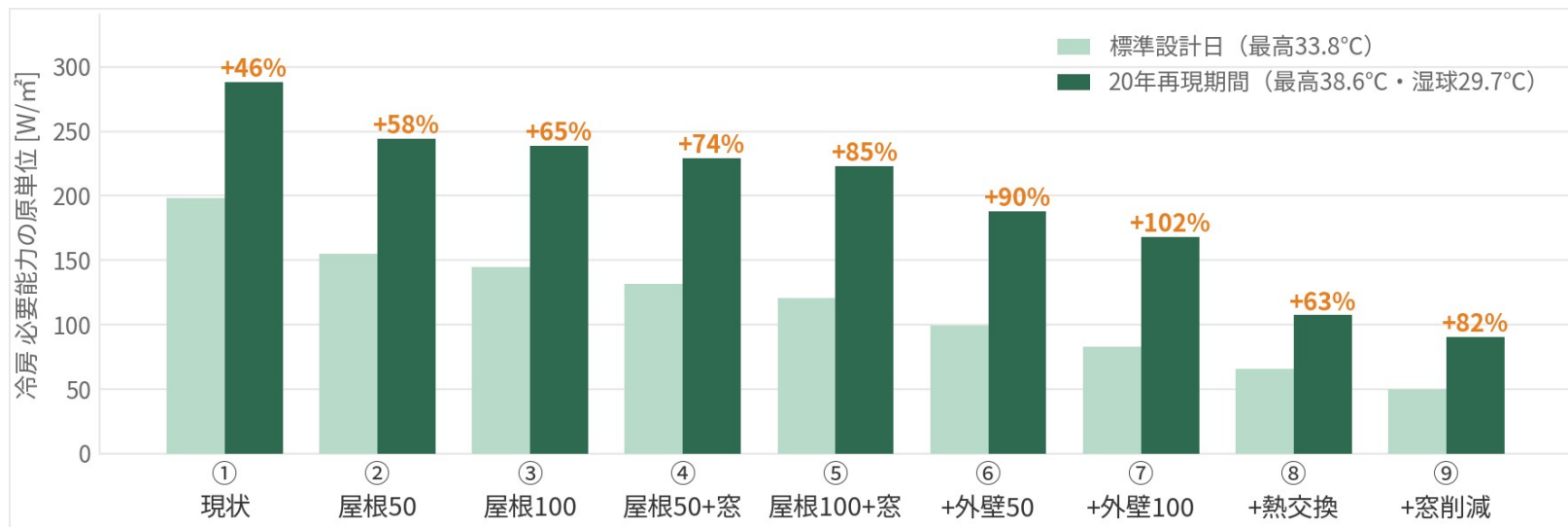
❏ 落とし穴① 気積の切り方



気積の過小評価は、そのまま必要能力の過小評価になる

床上一定高さで区切る「仮想天井」では、空調対象の気積は実際の約 1/3。W/ m² の数値は、全気積を解いたうえで初めて意味を持ちます。

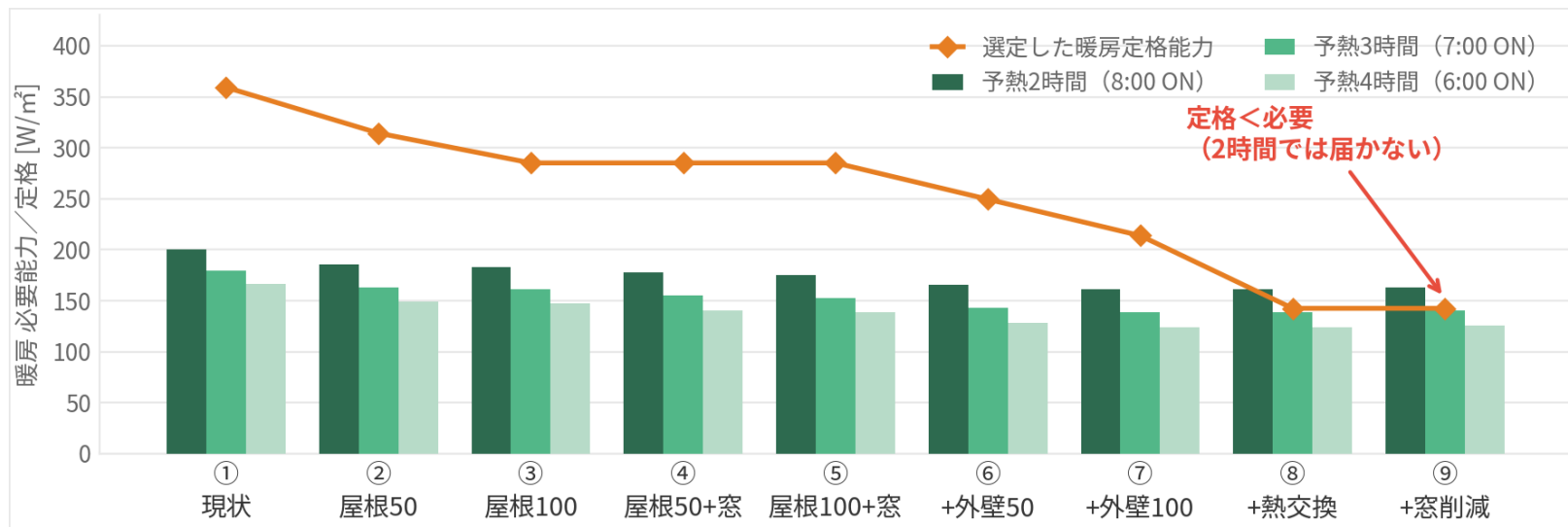
⚠ 落とし穴② どの気象条件で選ぶか



最も必要な日に足りない

20年に一度の猛暑では冷房の必要能力が +46 ~ +102%。標準設計日で選定した機器は 24 ~ 35% 不足しました。

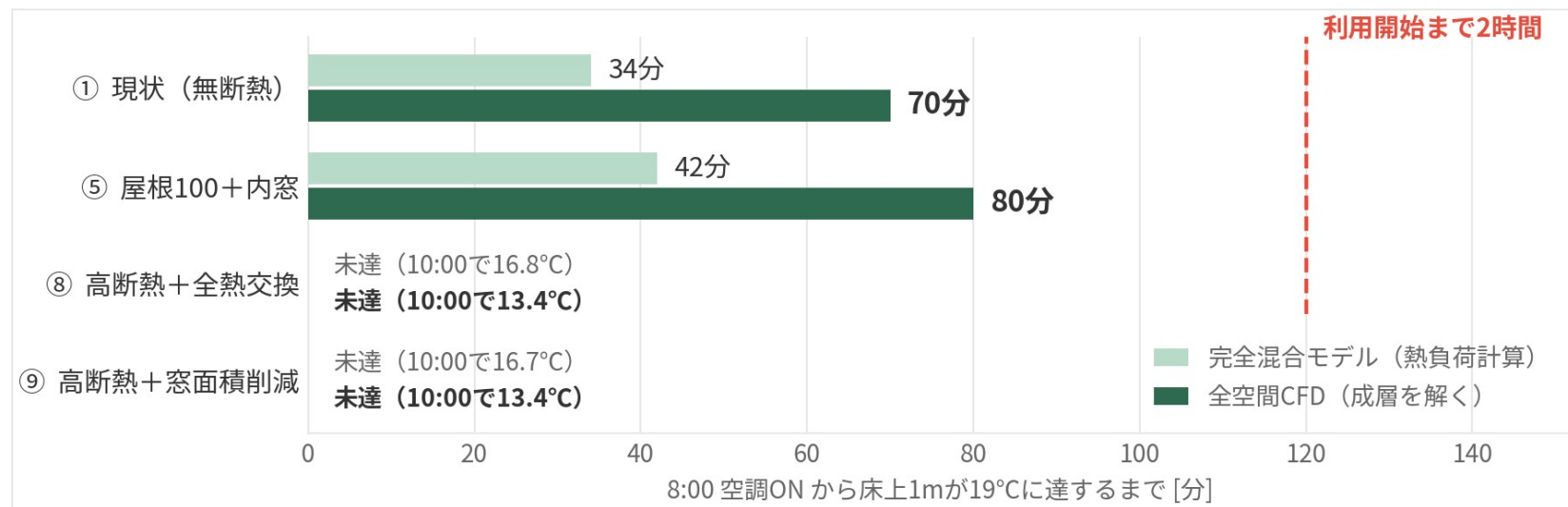
㊦ 落とし穴③ 高断熱ほど立ち上がらない



能力と予熱時間はトレードできる

予熱を1～2時間延ばせば必要能力は10～25%下がる。高断熱ケースは定格143 W/㎡に対し予熱2時間で162 W/㎡が必要。

㊦ 落とし穴④ 平均室温という近似



一様と仮定した計算は、立上りを約2倍楽観する

室平均が19°Cになっても、床上1mはまだ届いていない。「2時間で間に合うか」は成層を解かないと答えが出ない。



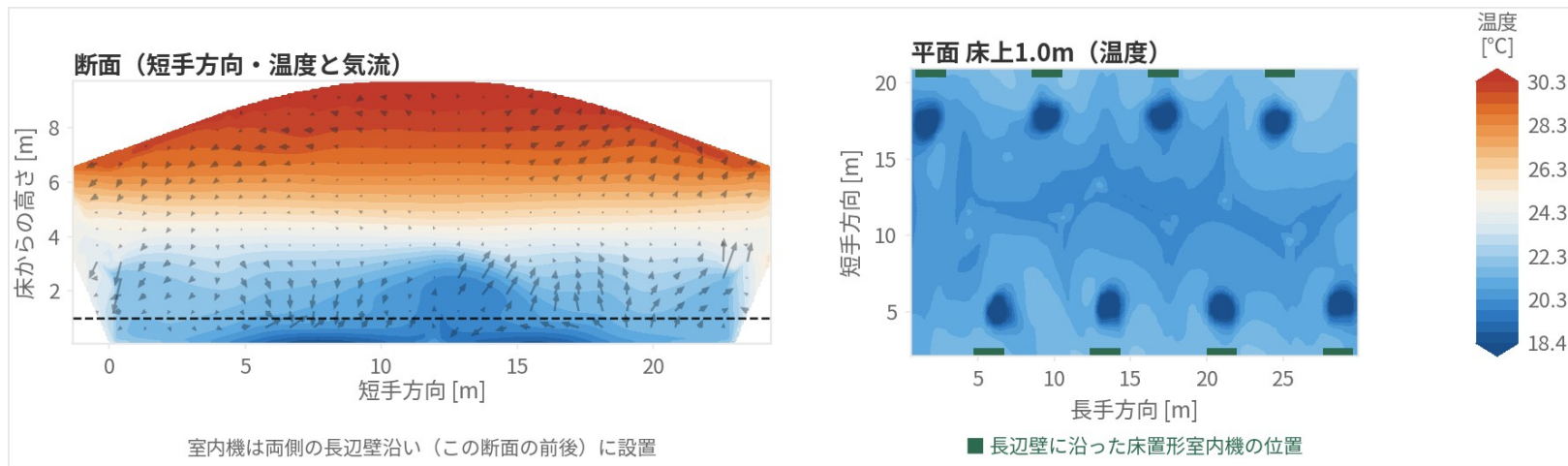
全空間 CFD

空気は、こう分かれている。

温度・気流・暑さ指数（WBGT）・温冷感（PMV）の分布を、断面と平面で確認しました。

＊ 冷房 維持： 温度と気流の分布

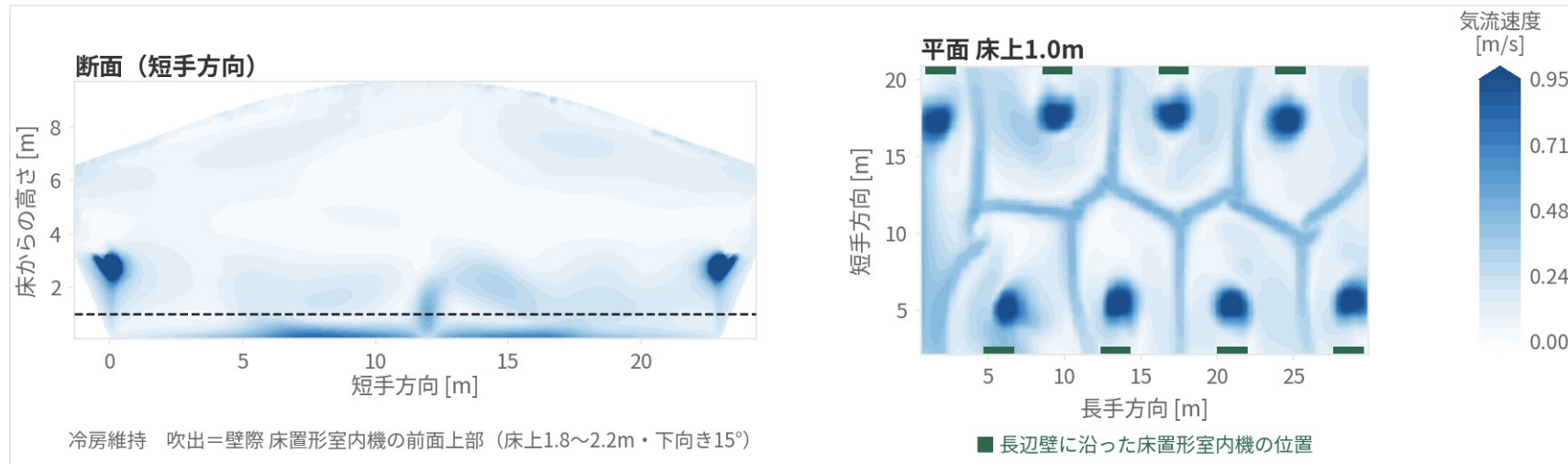
冷気は重いため床に落ちて溜まります。上部は設定どおりでも、人がいる高さは冷えすぎます。（ケース⑤）



① 床上 1m 20.7°C / 床上 6m 28.1°C、上下温度差 7.4K。判定（28°C 以下）は満たすが、居住域は目標より 7K 低い。

⇒ 冷房維持：気流速度の分布

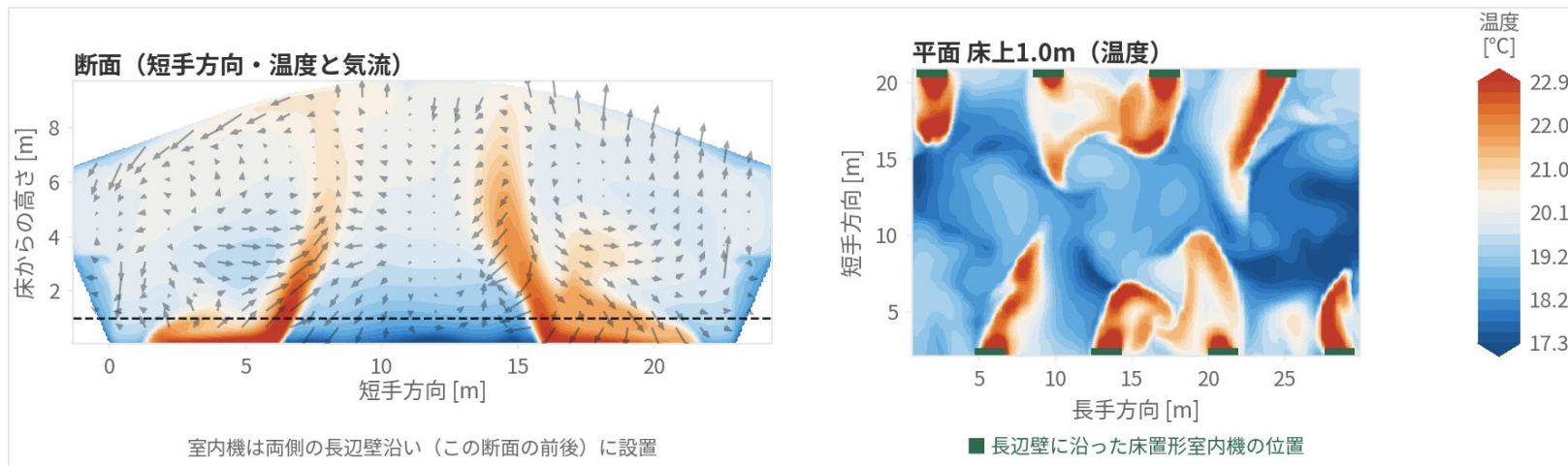
平面図の濃い部分が、両側の壁際から吹き出した気流が床でぶつかり合う位置です。（ケース⑤）



- ① 居住域の平均風速 0.23 m/s、上位 5% で 0.57 m/s。吹出し直下は 1 m/s 超。能力だけでなく風の当たり方まで設計対象になる。

🔥 暖房 維持：温度と気流の分布

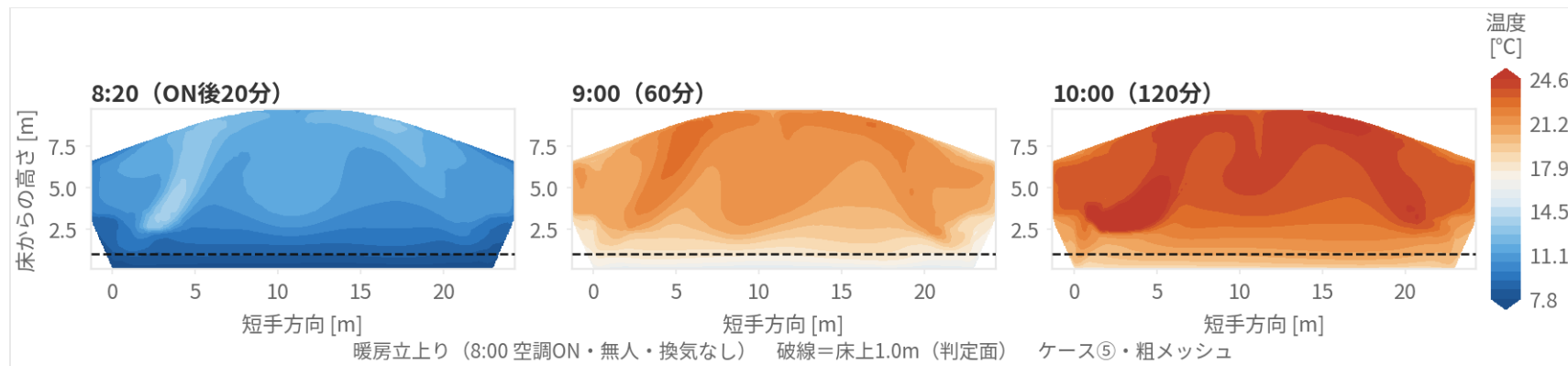
吹出しの位置が低いため、暖房を保つ運転では上下の温度差がほとんど生じませんでした。（ケース⑤）



- ① 床上 1m 19.3°C / 床上 6m 20.0°C、上下温度差 0.6K。暖房は「保つ」だけなら大空間でも成層しない。問題は朝に立ち上げることにある。

⑤ 暖房 立上り： 2 時間で室内はこう変わる

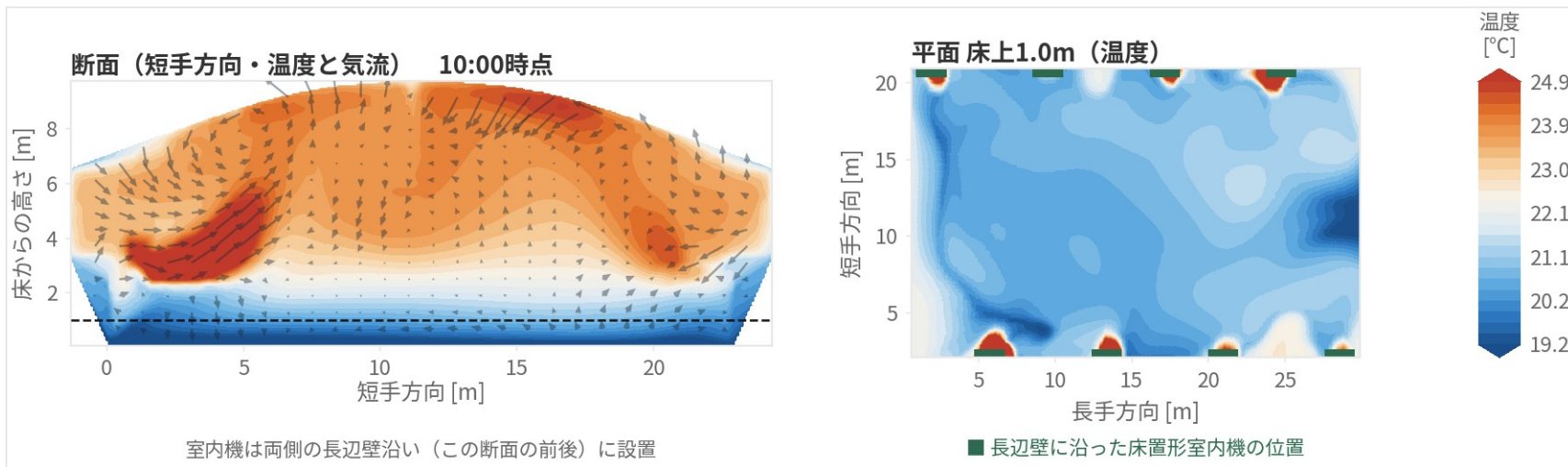
8:00 に空調を入れてからの断面温度。暖気は上へ、床付近は最後まで冷たいまま。（ケース⑤）



暖まるのは「上から」。人がいる高さは最後

室平均が目標に届いても床上 1m は追いつかない。立上り時間を室平均で判断すると、実際より早く終わる評価になる。

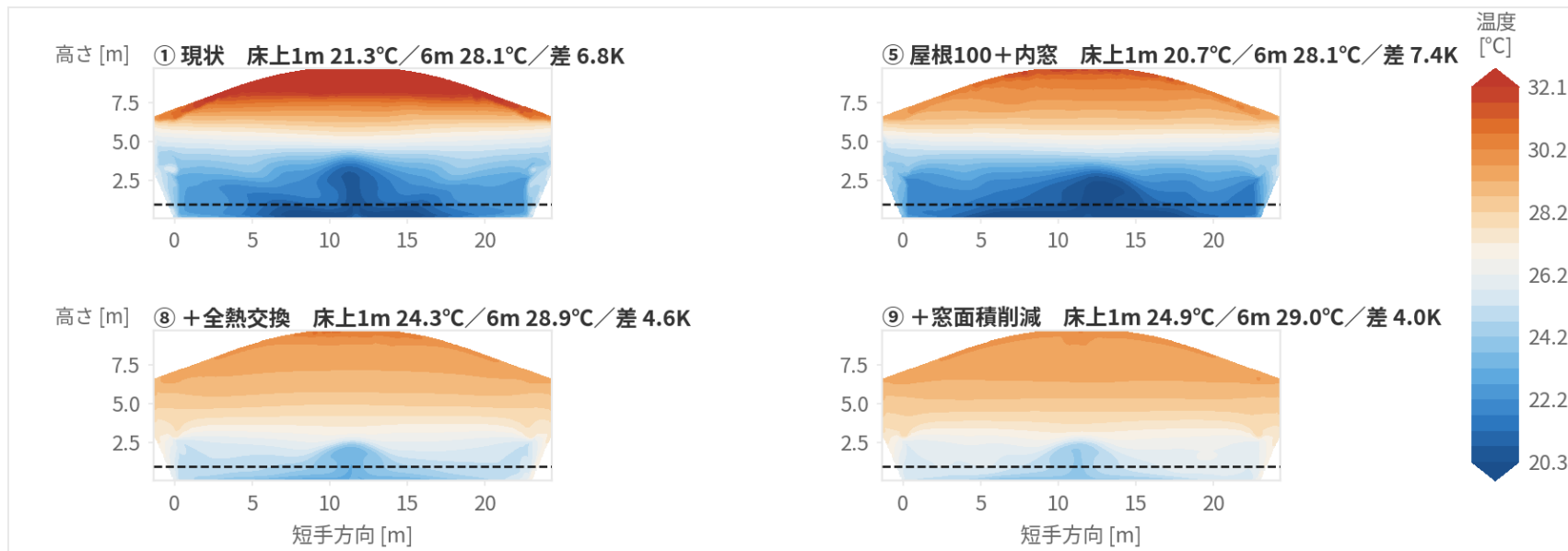
🔥 暖房 立上り： 10:00 時点の分布



上部に暖気が溜まり、床付近に冷たい層が残る

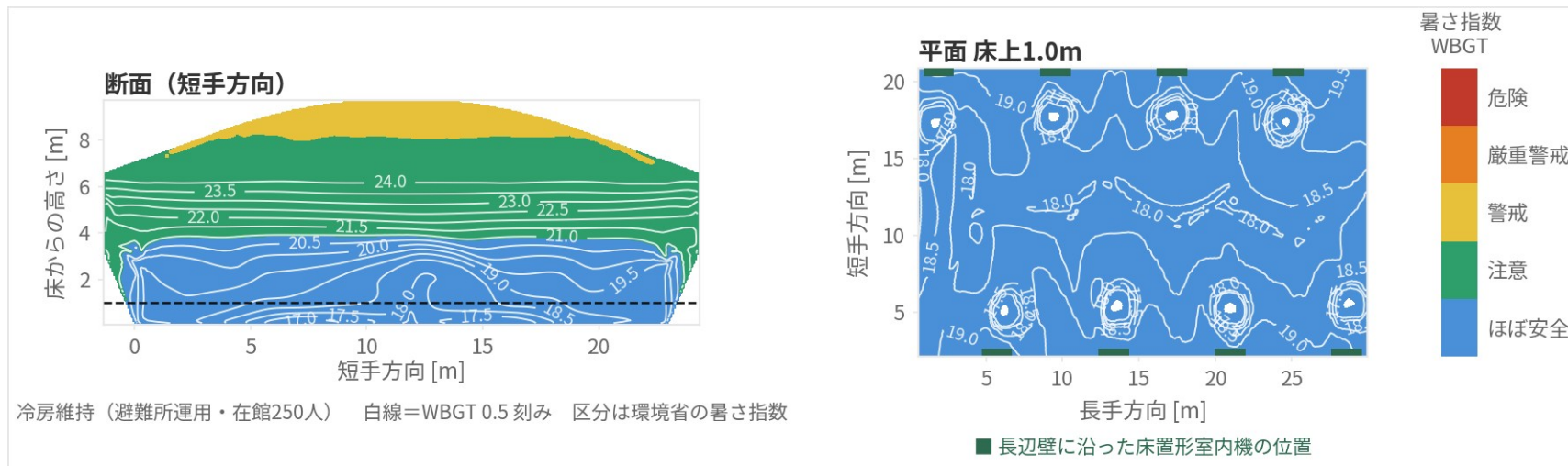
利用開始時刻の温度場。天井付近は 25°C 近く、床上 1m は 20.9°C。同じ室内で 5K 以上の差がついている。

断熱ケース別の温度分布（冷房維持）



① 上下差は① 6.8K → ⑤ 7.4K → ⑧ 4.6K → ⑨ 4.0K。どのケースも「28°C 以下」は満たしますが、居住域の冷えすぎ方は大きく異なります。

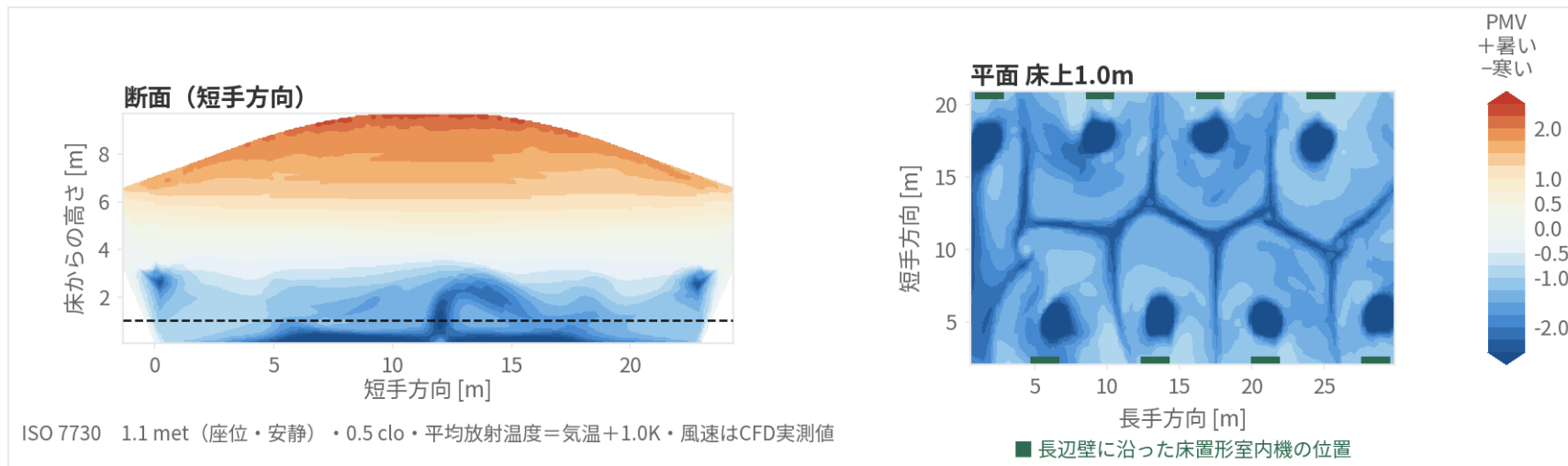
暑さ指数（WBGT）の分布



28℃を保てるかどうか、「注意」と「警戒」の境目

空調が効いていれば居住域は「ほぼ安全」域、上部は「注意」域。能力不足で室温が 31℃ まで上がると WBGT 25.6（警戒）、35℃ では 27.7 に達します。

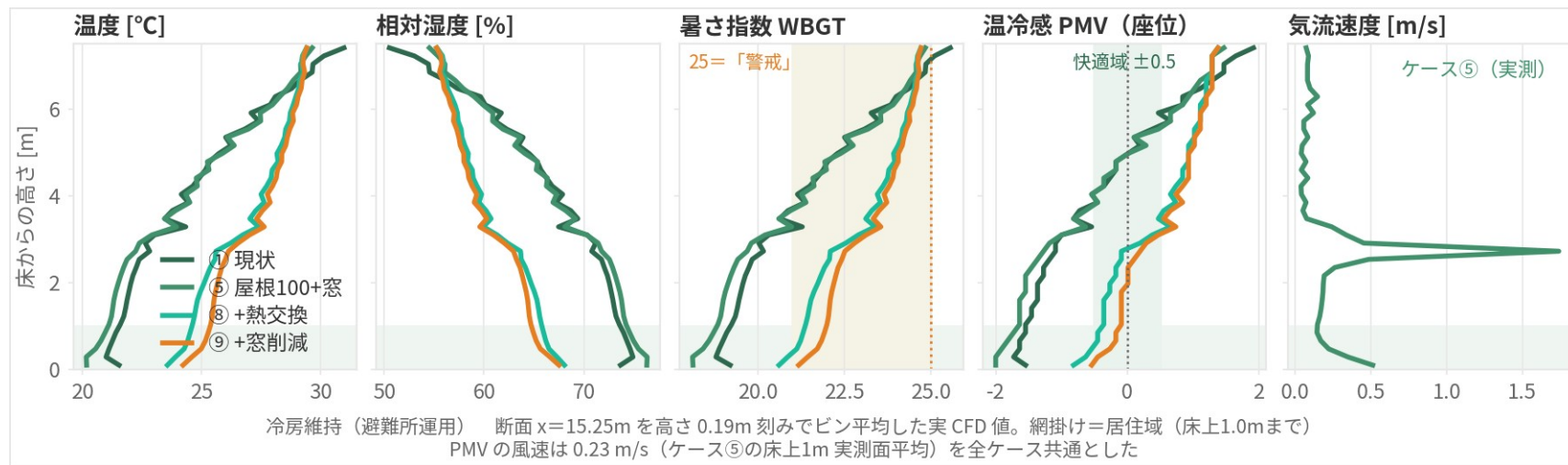
温冷感（PMV）の分布



「合格」でも、居住域は「涼しい」側に振れる

座位・安静（met 1.1・clo 0.5・風速はCFD実測値）を想定したPMV。床上1mの平均は-1.7で快適域（±0.5）を大きく外れます。

高さ方向の温度・湿度・体感



- ① 床に近いほど温度が下がり、相対湿度は上がります。暑さ指数は居住域で「ほぼ安全」域に収まる一方、PMV は快適域を外れて「涼しい」側に振れます。

① この可視化の前提

温度と気流

OpenFOAM 全空間 CFD の解析出力をそのまま描画（断面 $x = 15.25\text{m}$ / 平面 床上 1.0m ）。矢印は断面内の風向、色は温度。

湿度の扱い

CFD は温度場と流れ場を解いています。湿度は吹出（コイル出口・ほぼ飽和）と室状態を結ぶ混合線で補い、局所の相対湿度を算定。

暑さ指数（WBGT）

屋内・日射なしとして $0.7 \times \text{自然湿球} + 0.3 \times \text{黒球}$ 。黒球温度は気温に等しいと仮定。区分は環境省の暑さ指数に準拠。

温冷感（PMV）

ISO 7730。1.1 met（座位・安静）、0.5 clo、平均放射温度 = 気温 + 1.0K。風速は CFD の解析値。

数値の位置づけ

温度・気流・到達時間は CFD の解析値です。湿度・WBGT・PMV は上記の前提にもとづく算定値であり、絶対値ではなく傾向としてお読みください。

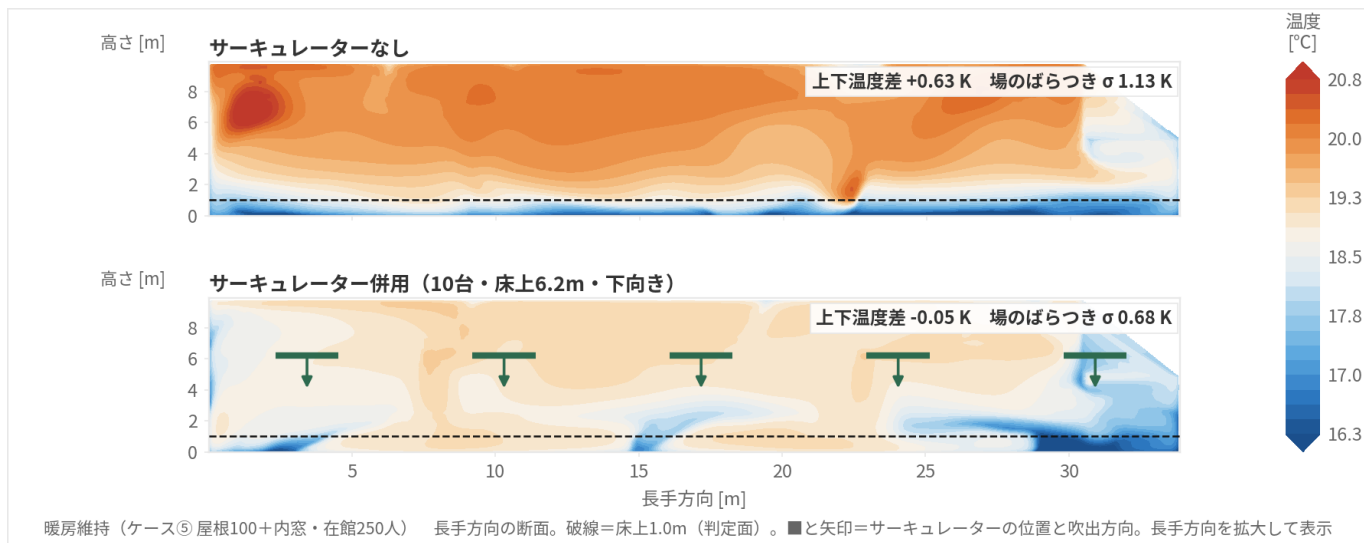


サーキュレーター

温度差は消える。
ただし、消え方に条件がある。

10 台を床上 6.2m に下向きで設置した場合の、熱分布の変わり方を見ました。

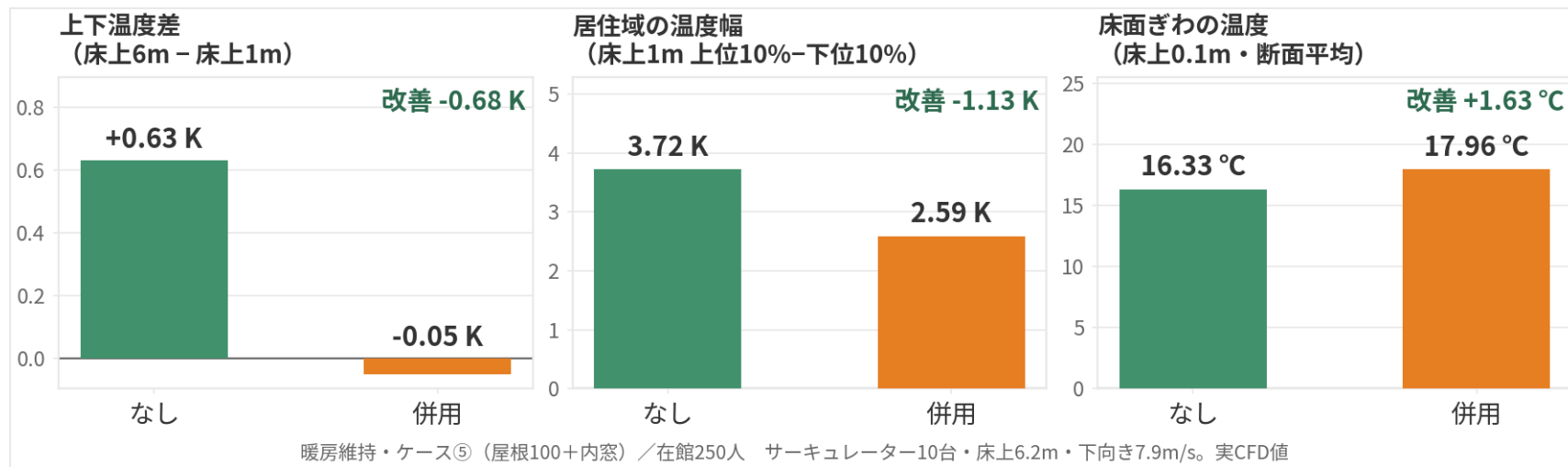
🌀 暖房 維持：熱分布はこう変わる



上に溜まった暖気が下ろされ、床ぎわの冷たい層が消える

床に沿って伸びる青い層が、下の図ではほぼ消えている。上下温度差 +0.63K $\rightarrow$ -0.05K、空間全体のばらつきも 4 割減。
(⑤ 屋根 100 + 内窓)

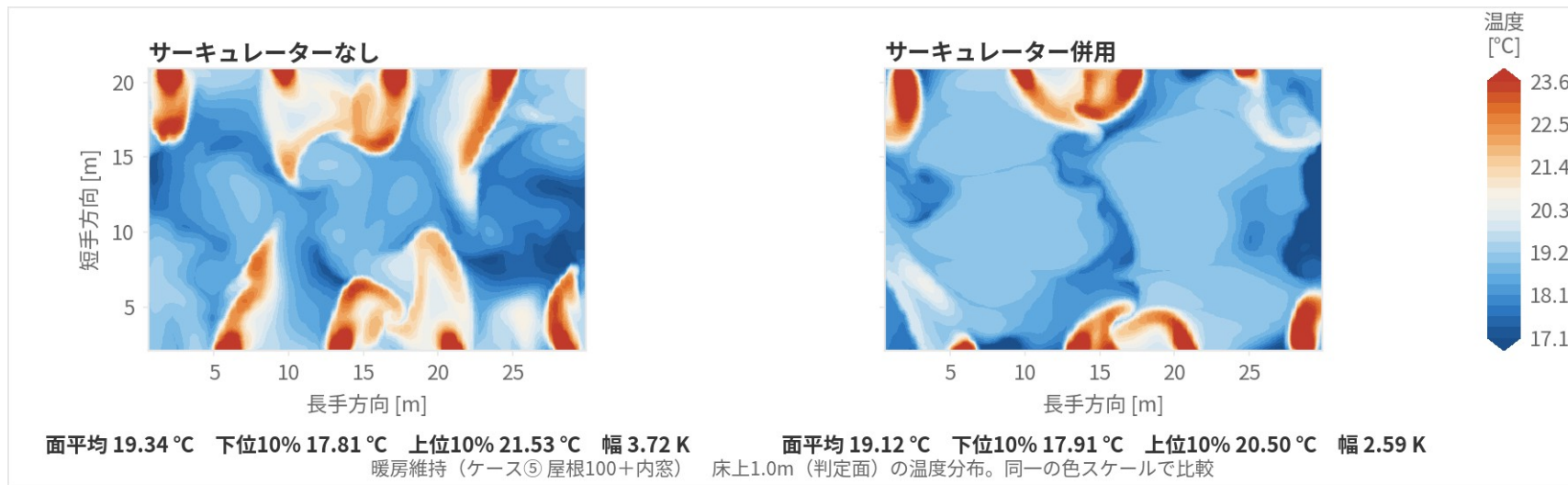
暖房維持：改善の中身



床ぎわは 1.6°C 暖まり、ムラは 3 割減る

上下温度差も同じ高さでのムラも、はっきり小さくなる。床上 0.1m では 16.3°C → 18.0°C。ただし判定面（床上 1m）の面平均は 19.34°C → 19.12°C とわずかに下がる。

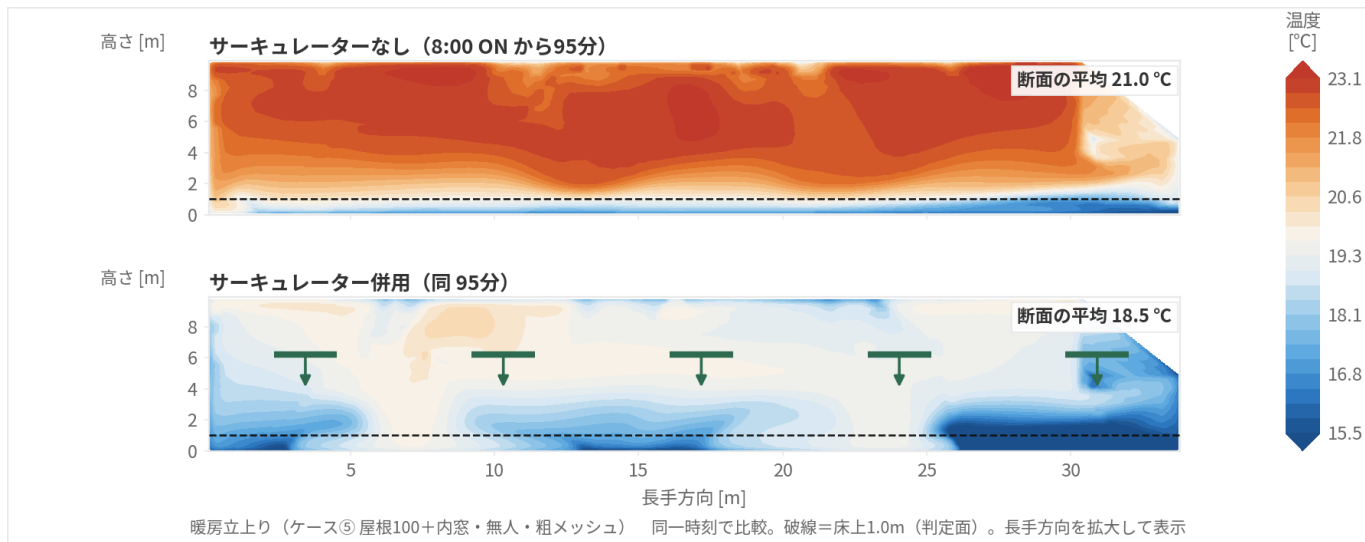
≡ 暖房 維持：床の高さで見ると



同じ床上 1m での、場所による差も小さくなる

床上 1.0m の平面。吹出し直下の赤い斑と居住域の低温部の差が縮み、温度の幅は 3.72K → 2.59K。（⑤ 屋根 100 + 内窓）

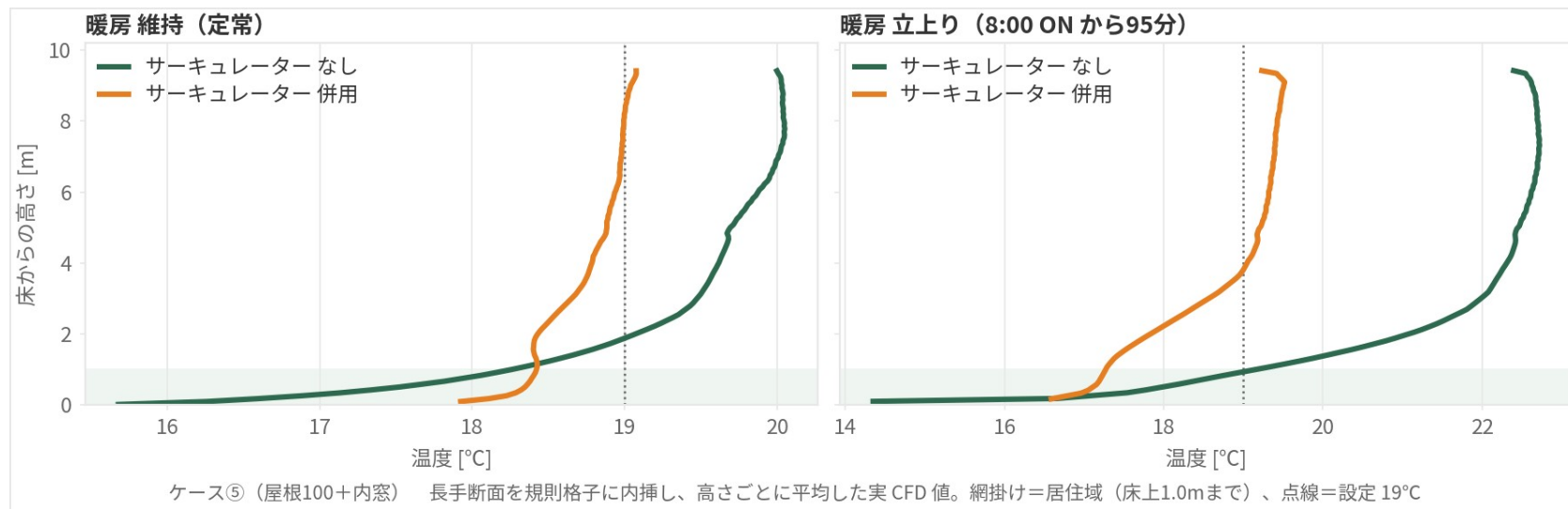
⚠ 暖房 立上り：同じ装置が逆に働く



均一にはなる。しかし全体が暖まっていない

朝の立上げ中は、まだ下ろすべき暖気が上に溜まっていない。断面の平均は 21.0°C → 18.5°C。（⑤・空調 ON から 95 分）

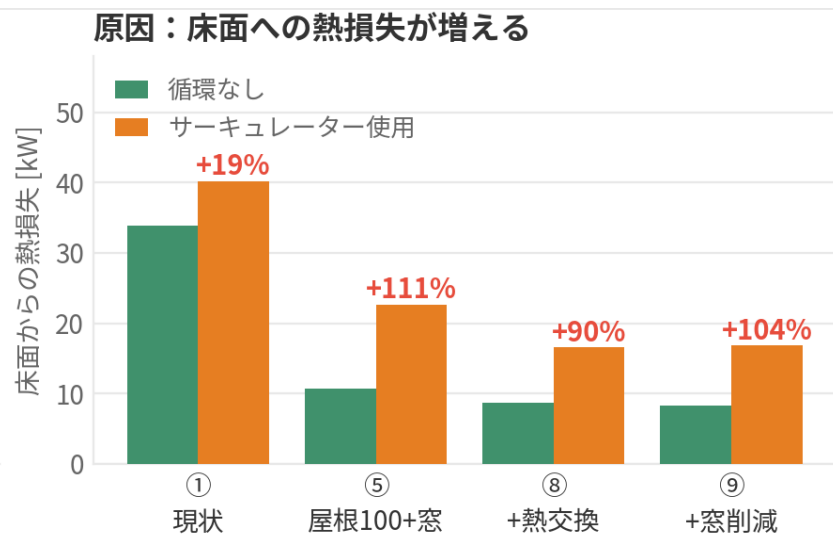
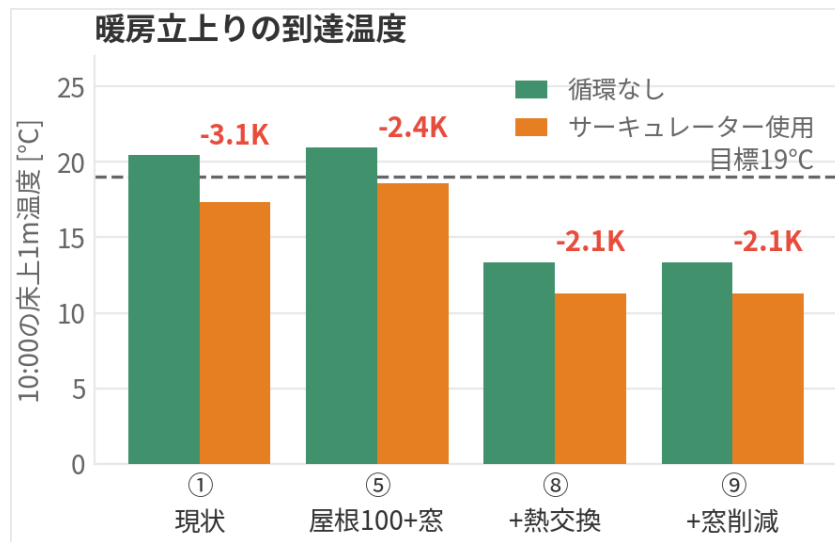
二つの運転を、同じ図で見比べる



維持では床ぎわが暖まり、立上りでは全体が冷える

維持（左）は床上 1.1m より下で橙が緑を上回る＝床に近いほど暖まる。立上り（右）は逆転高さが床上 0.14m まで下がり、床上 1m で -1.9K。

🌀 なぜ立上りでは逆効果になるのか



下向きの気流が、床に逃げる熱を倍近くに増やす

立上りでは床上1mが2.1～3.1K低下。床への熱損失が+19～+111%増えるため。「常時回す」ではなく、立上り中は止め、暖まってから回す制御が要る。



まとめ

決める順番を変える。

「どの機器を何台か」より先に、
「どちらの機能を厳しく見るか」「何時に点けるか」を決める。

☑ 設計を通すための 4 つの原則



全気積で解く

仮想天井で区切らない。
W/ m² は全気積を解いて初
めて意味を持つ。



極値で選ぶ

避難施設の機能を持たせ
るなら、再現期間で確認
する。



居住域で判定する

室平均ではなく床上
1m。成層を解ける手法
で確かめる。



運転と一緒に決める

断熱・容量・予熱時間・
気流制御は一体で決める。

この 4 つを外さなければ、二つの機能は同時に成立する

本検討では、断熱を強めた仕様でも予熱 4 時間（6:00 空調 ON）を前提にすれば、選定した暖房容量で立上りが成立することを確認しています。

⚠ この結果をどう読むか

モデルと地域

1976 年竣工・アーチ屋根／東京条件。傾向は一般化できるが、 W/m^2 の値は流用できない。

CFD の範囲

9 ケース中、全空間 CFD は代表 4 ケース（24 ケース分）。残りは内挿で一部は可否を断定していない。

立上りの精度

立上りは粗いメッシュ。到達時間は楽観側の可能性。冷房維持は熱収支残差 28 ～ 36%（判定には未使用）。

分布図・体感指標

温度・気流は CFD の解析出力。湿度・WBGT・PMV は前提にもとづく算定値。

① 計算に用いた条件・式・出典は台帳化しており、再現可能な形で保管しています。



ご清聴ありがとうございました。

必要な W/m^2 は出せます。難しいのはその先 —

二つの機能のどちらを厳しく見るかを決めることが、設計の起点になります。

- 計画段階でのご相談・必要能力（ W/m^2 ）の把握
- 既存体育館の負荷検証（全空間 CFD ・温熱環境評価）
- 断熱改修とセットにした空調計画・ZEB 化検討
- 補助事業の適用可否の整理

ZEB 株式会社

ZEB プランナー登録番号 ZEB2023P-00138

岡山県岡山市北区柳町 2-11-20 ダイトクビル 8 階北

TEL 086-201-1894 / zeb@zeb.co.jp / <https://www.zeb.co.jp>