

ZEB 設計技術実証スペースにおける取組～天井放射空調の冷房性能と明るさ感評価による光環境の検討～

Development of high energy efficiency and comfort design method in the ZEB demonstration space

中田 清*

Kiyoshi Nakata

大道 将史**

Masafumi Daido

瀬瀬 一真*

Kazuma Koketsu

要 約

技術研究所の ZEB 設計技術実証スペースにおいて、先進的省エネルギー技術を用いた設計技術の確立を目指した取り組みを行っている。水熱源の天井放射空調技術においては、送水温度と流量をパラメータに運用試験を行い、その放射パネル表面温度・空調能力・室温・温冷感への影響を確認することで、性能向上に資する設計仕様を抽出することができた。また、明るさ感などの視環境評価技術を設計に導入する取り組みにおいては、省エネルギーのために従来よりも机上面照度を抑制した光環境であっても、オフィス業務に支障がないように利用者に暗い印象を与えない空間に設えることが、仕上げや什器の反射特性を含めた設計配慮によって可能であることを示した。

目 次

§ 1. はじめに

§ 2. 天井放射空調の熱源往水温および流量に対する冷房性能について

§ 3. 設計照度を抑制した場合の光環境の評価と設計的配慮について

§ 4. おわりに

§ 1. はじめに

技術研究所のオフィスを ZEB 設計技術実証スペースとして整備し、先進的省エネルギー技術を用いた設計手法の習得を目指した取り組みを行っている¹⁾。

本報では、「フォーカスルーム」(写真-1)に導入した天井放射空調の熱源往水温および流量に対する冷房性能について、「ワークスペース」(写真-2)における設計照度を抑制した場合の光環境の評価と設計的配慮について報告する。

§ 2. 天井放射空調の熱源往水温および流量に対する冷房性能について

吹出気流のドラフト感がなく、低騒音が特徴である天井放射空調の導入試験を行っている。

* 意匠設計部サステナブル建築設計課

** 技術研究所建築技術グループ

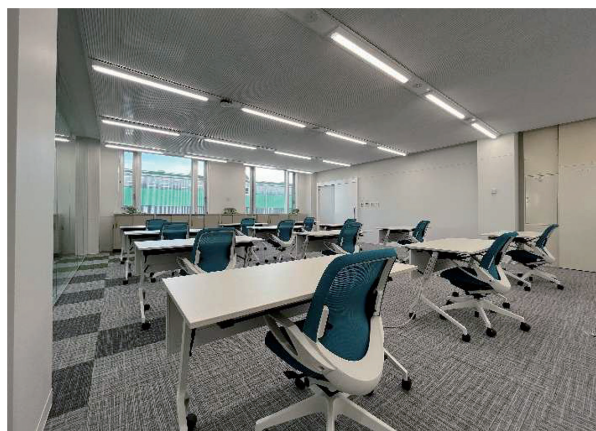


写真-1 フォーカスルーム内観



写真-2 ワークスペース内観

天井放射空調について、当社は施工実績はあるものの、設計はこの取り組みが最初の事例である。竣工後の設計性能検証とともに、運用時の機器設定や利用者の温冷感に関する知見などを得るよう取り組みを行っている。

前回報告では、冷房時の基本的な室内環境の性能である室内気流性状・垂直温度分布・上下温度差・温熱環境評価指標 PMV が非常に良好であることを示した²⁾。

今回は、省エネルギーと室内環境の向上とを両立できるシステムの制御方法の検討として、運用時の熱源装置の設定である往水温と流量を変化させた場合の冷房性能について評価を行った。

2-1 運用条件

熱源装置の運用条件を表一に示す。目標の放射パネル表面温度 20℃に対し、熱源の往水温を段階的に 2℃ずつ下げて運用した。最も低い 14℃の往水温については熱源水量を減らした条件を設定した。以降の評価では、各条件に対し代表日を選定し、そのデータを比較考察する。

2-2 放射パネル表面温度

放射パネル表面温度の推移を図一に示す。ケース A は、往水温が設計定格条件である 18℃の設定だが、表面温度が目標の 20℃に達しなかった。ケース B では、往水温を 16℃に低下させることで表面温度は低下したものの 20℃にわずかに達しなかった。ケース C では、往水温を 14℃に低下させることで表面温度は 20℃に達するが、2 方弁の ON/OFF での表面温度制御によるハンチング(温度の上下変動)が生じた。一方、ケース D では、往水温 14℃の条件で熱源水量を減らすことで、外部からの熱負荷が少なくなる夕方まではハンチングが生じなかった。

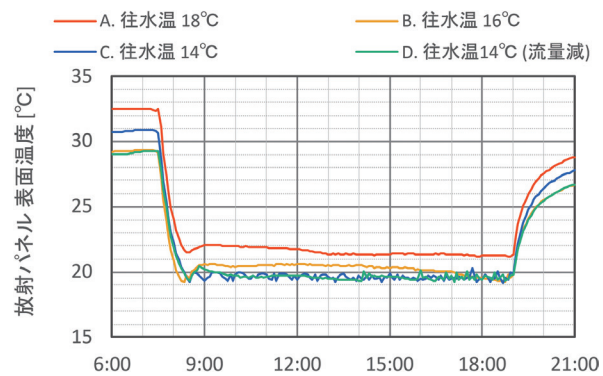
2-3 放射パネルの放熱量

(1) 放熱の内訳

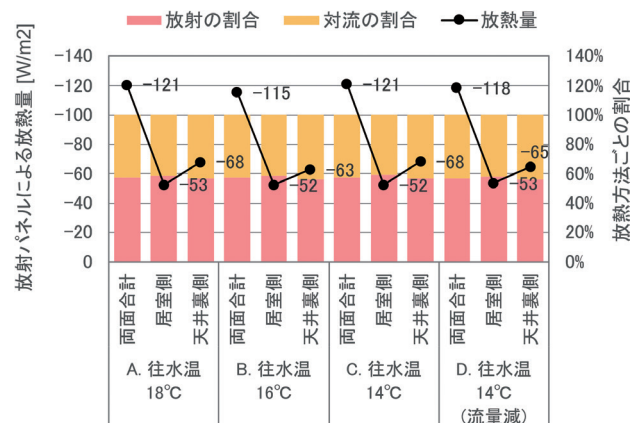
天井放射パネル表面温度を基準に、壁や窓などの室内

表一 運用条件

ケース	往水温 [℃]	熱源水量 (定流量弁の設定値) [L/min]
A	18	28
B	16	28
C	14	28
D	14	18

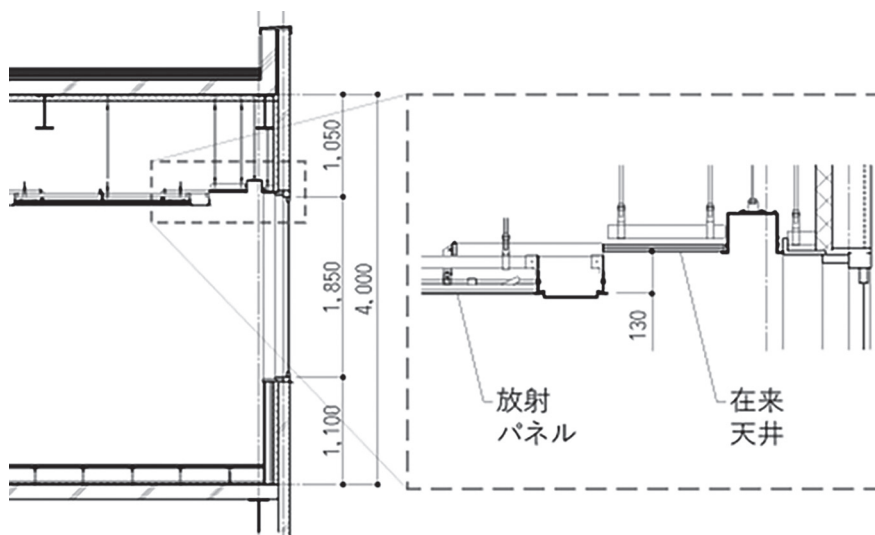


図一 放射パネルの表面温度の推移 (代表日)



図二 放射パネルの放熱量 (代表日の 15:00)

※負の放熱量は冷却を意味する



図三 放射パネル納まり断面図

部材の表面温度・室温・天井裏の気温の実測値を用いると、放射パネルの放熱量を算定することができる。算定した各ケースの 15:00 における放熱量を図-2 に示す。

往水温に関わらず、室内側・天井裏側ともに放射 60% 弱・対流 40% 強の割合で放熱していることがわかる。また、天井裏側の放熱量が室内側の 1.25～1.3 倍となっており、室内側よりも天井裏への放熱量が多いことが分かった。その理由は、壁面との納まりによって室周囲に設置した在来天井と天井放射パネルに 130 mm の段差があり、その隙間から天井裏に室内側から熱が流入して、天井裏側での熱処理量が増大するためと考えられる (図-3)。なお、この段差は、面積当たりの重量が異なる放射パネルと在来天井が地震時に異なる挙動を示すため、互いの天井下地を接合せずに設置して構造的に縁を切るために生じている。また、これは天井裏に設置した換気設備の還気口も兼ねている。

(2) カタログ性能との比較

前項で算出した放射パネル放熱量をパネルメーカーのカタログの能力線とともにプロットしたものを図-4 に示す。ハンチングを生じたケース C (往水温 14℃) のデータを除けば概ね線形性があり、カタログ性能よりも大きい放熱量となった。前述の還気の気流が実際に生じており、放熱量が増えていると考えられる。

2-4 室内温熱環境

(1) 上下温度分布

各ケースの 15:00 での上下温度分布を図-5 に示す。インテリア・ペリメータの各ゾーンの居住域範囲において、床面と高さ 1.8 m の温度差が 0.5℃ 以内である。上下温度差が小さいという天井放射空調の快適性における長所が実現できている。ただ、往水温の低下により放射パネル表面温度を 20℃ 程度にした場合 (ケース B, C, D)、同時に室温も低下し、一般的な夏期の設定室温の 26℃ を下回った。つまり、高めの室温とそれを補う天井からの冷輻射という目標の温熱環境にはならなかった。

(2) 温熱環境評価指標 PMV の推移

PMV とは人体の温冷感の予測指標で、-0.5～0.5 では不満足に感じる人の割合が 10% を切るとされる。気流 0.05 m/s・代謝量 1.1 met・着衣量 0.6 clo として FL+1.1 m で算出した室中央での PMV の推移を図-6 に示す。ケース A の往水温 18℃ の場合は、夕方に外部からの熱負荷が少なくなるまではやや暑い環境となる。往水温を 16℃、14℃ に下げると (ケース B, C, D)、始業の 8:30 までに $-0.5 < PMV < 0.5$ の中立域に達する。いずれのケースも立上り負荷の処理後は緩やかに PMV が下がり続ける。

2-5 熱源運転仕様に関する課題点

熱源の往水温と流量を変化させ、天井放射空調の冷房性能への影響を評価した。14℃ まで往水温を下げれば目標パネル表面温度 20℃ に達することが確認できた。しか

し 14℃ の往水温では、除湿システムの処理量変動によっては配管近傍で結露する可能性を排除できない。往水温の低下に伴い室温が 26℃ を下回ったことから、往水温 16℃ 以上の運用で快適な温熱環境を実現できるよう目標パネル表面温度と室温の組合せを再検討する必要がある。

また、空調稼働中は PMV が緩やかに低下し続けた。放射パネルを通過する熱源水量に対して定流量システムを試行したが、低負荷時にも快適性を担保するためには流量調整機能を備えることが望ましいと考えられる。

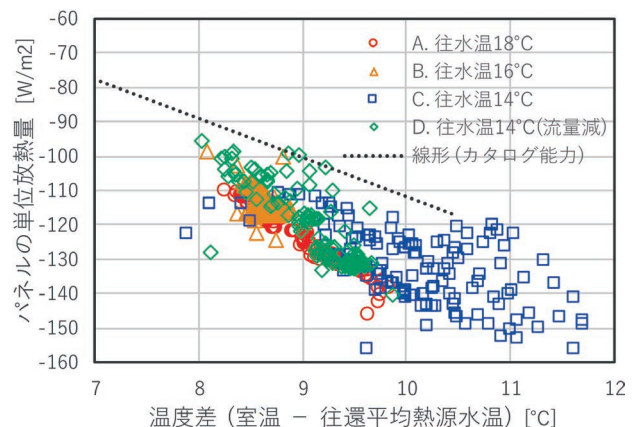


図-4 放射パネルの放熱量
※負の放熱量は冷却を意味する

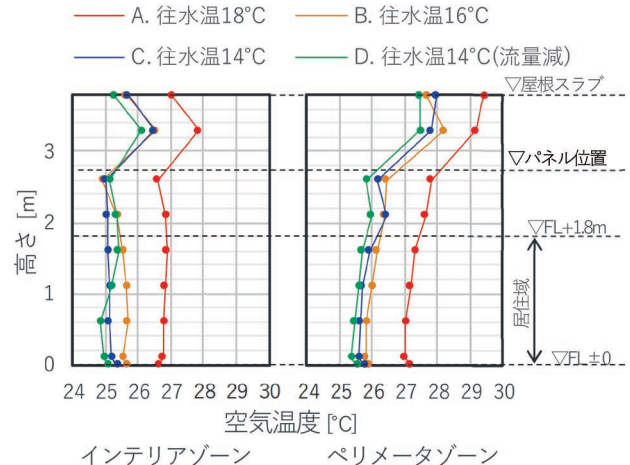


図-5 上下温度分布 (代表日の 15:00)

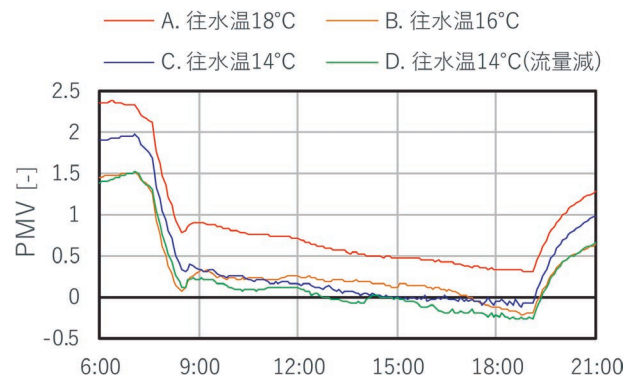


図-6 室中央での PMV の推移 (代表日)

§3. 設計照度を抑制した場合の光環境の評価と設計的配慮について

LED 照明の普及によって照明エネルギーは大きく削減されたが、より高度な省エネルギーが求められる建築物においては、さらなる削減が求められる。その手段のひとつが設計照度の低減である。

これまでオフィスの設計では、製図作業などに対する推奨照度^{3),4)}である 750 lx での設計が一般的であったが、近年の省エネルギー志向のオフィスでは設計照度を抑える傾向がみられ、VDT 作業（PC のディスプレイ端末などを使う作業）の推奨照度^{3),4)}にあたる 500 lx や事務所衛生基準規則による一般的な事務作業の最低基準⁵⁾の 300 lx が設計照度として採用されることがある。しかし、低照度で設計した場合に、室内空間を暗く感じて陰気な印象を与えることがあるといわれる。これは、従来の机上面照度設計では作業の視対象の明るさは担保できるが、空間の明るさは担保できないためである。これまで高照度で設計された場合には特段の配慮がなくても一定の空間の明るさが確保されていたが、低照度で設計する場合には空間の明るさの確保に別の対応が必要といえる。

そこで、今回の取り組みでは 500 lx と 300 lx の2つのパターンの低照度設定に対して室内光環境の明るさなどについて評価し、低照度設計によって視対象および空間の明るさに問題が生じないかを確認した。

3-1 評価する視野範囲について

作業の視対象を注視している状態（以下、フォーカルモード）と、座席正面方向や部屋全体を広く見る状態（以下、アンビエントモード）⁶⁾に分けて評価を行う。

フォーカルモードでは、PC 作業を前提として PC 画面を注視した際の俯角仰角 15 度・水平角度 20 度の範囲内における PC 画面と背景の輝度比を分析して評価する。この状態の視野を中心視状態の「周辺視野」とする。

アンビエントモードでは、座席からの部屋に対する印象と部屋全体の総合的な印象を評価するために、2種類の視野範囲を定義する。椅子座における正面の視界（仰角俯角 40 度・水平角度 100 度）を「有効視野」とし、部屋全体を見渡す視界（仰角俯角 40 度・水平角度 360 度）を「全体俯瞰」とする。

図-7 にそれぞれの視野範囲を示す。各視界範囲の輝度分布や明るさ感推定値を算出する場合に用いた。

用率の高い東西 2 か所の鳥型配置の座席を対象とした。

3-3 測定・評価方法

フォーカルモードに対し、机上面照度に加え、発光する PC 画面とその周辺の輝度を測定し、その輝度比を指標として評価した。アンビエントモードに対しては、空間の輝度分布を測定し、人の明るさ知覚を近似する明るさ感推定値を算出し指標として評価した。

輝度分布の測定は全天空カメラで撮影した全方位画像を用いて行うことができ、アピアランス設計支援ツール「REALAPS」を用いて輝度分布データから明るさ感検討画像を生成することで、明るさ感の分析を行った。

測定は 2025 年 2 月 27 日と 3 月 4 日に実施した。表-2 に主な測定条件を示す。なお、外部光環境の影響を把握するために消灯状態でも同様の実測を行った。

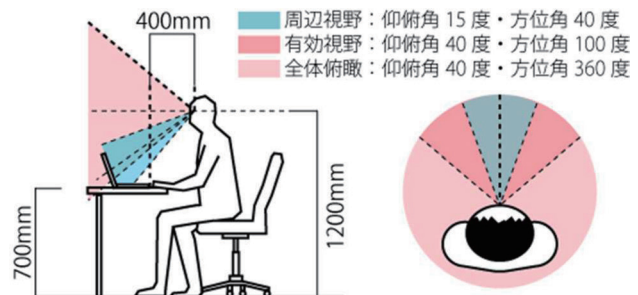


図-7 評価を行う視野範囲

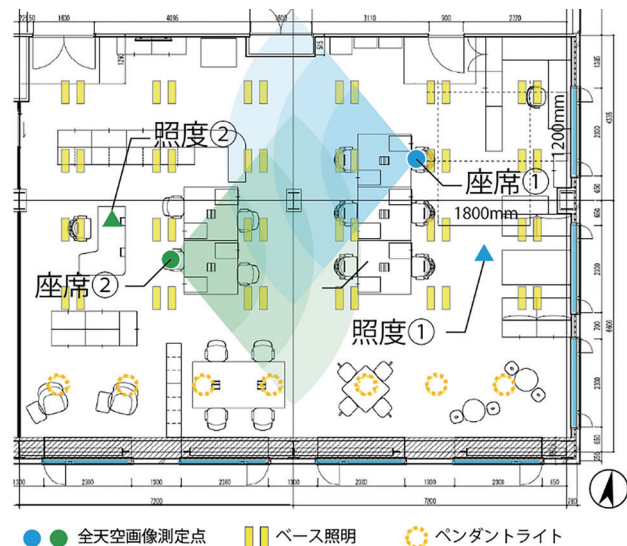


図-8 平面図

3-2 評価対象室の概要

取り組みはワークスペースを対象に実施した。対象室の平面図を図-8 に示す。照明は天井高 2,800 mm のグリッド式システム天井に設置され、一般部はシステム天井用 LED 照明器具が長辺 1.8 m ピッチ・短辺 1.2 m ピッチで、南側外壁沿いのエリアは人感センサー連動のペンダントライトが設置されている。今回の評価は、座席利

表-2 輝度対比および明るさ感推定値の測定条件

測定箇所	座席①・座席②
壁面に対する開口面積比率	東面 41%・南面 37%
設定照度 [lx]	消灯・300・500
外部光環境	晴れ（日中）・曇り（日中）・夜間
ブラインド	なし・あり（スラット閉鎖）

3-4 フォーカルモードにおける評価

作業対象を注視した状態を机上面照度の日変動及び輝度対比を用いて評価を行った。

(1) 照度

各照度設定での机上面照度の日変動を図-9と図-10に示す。晴れのときの座席①は、照度設定に関わらず朝に3,000 lx程度に達する。その後徐々に減衰して夜間には設定照度付近となる。一方、晴れのときの座席②は最大で1,000 lx程度であり、設定照度との差は座席①に比べて小さい。机上面照度は開口部からの入射光の影響が大きく、場所に応じて適切なブラインド操作が必要である。

(2) 視対象と背景の輝度比

輝度比は視対象の輝度に対する背景輝度で表され、輝度比が1から離れるほど作業効率の低下やストレスの要因となる。そのため輝度比は1～1/3の範囲内をとることが推奨されている^{5),7)}。

中心視状態でのPC画面輝度に対する背景輝度の輝度比を図-11に示す。また、実際の輝度分布を図-12に示す。晴れのときは、ブラインド不使用であると席位置によっては日光により背景輝度が高すぎる場合がある。一方、曇りのときは照明を点灯していれば推奨輝度比をほぼ満たすことが分かる。低照度設計であっても輝度比が大きく悪化することはない、ブラインドを使用したり、個人ごとに画面輝度を調整するなどの対応で十分対応できると考えられる。

3-5 アンビエントモードにおける評価

アンビエントモードにおける座席から見た部屋の明るさ、部屋全体を見渡した明るさは、明るさ感推定値を用いて評価した。明るさ感推定値とは、対象範囲の輝度分布を明るさの知覚尺度値(NB値)の分布に変換して表-3の分類で領域分けし、その各領域の立体角を用いて式(1)で算出した比率Rを、さらに式(2)に代入して算出した数値Eである⁶⁾。

$$R = (B - D) / (D + N + B) \quad (1)$$

$$E = 152.36 + 144 R \quad (2)$$

B: Bright 領域の立体角

D: Dark 領域の立体角

N: Neutral 領域の立体角

E: 対象範囲の明るさ感推定値

表-3 オフィスにおけるNB値の領域分け⁶⁾

NB 値	明るさ感に対する影響
4 以下	暗い色と判断され明るさ感に影響を与えない
4～6.5	薄暗く見え明るさ感を低下させる (D: Dark 領域)
6.5～7.5	明るくも暗くもなく見え、明るさ感に影響を与えない (N: Neutral 領域)
7.5～9	明るく見え、明るさ感を向上させる (B: Bright 領域)
9 以上	光源と判断され、明るさ感に影響を与えない

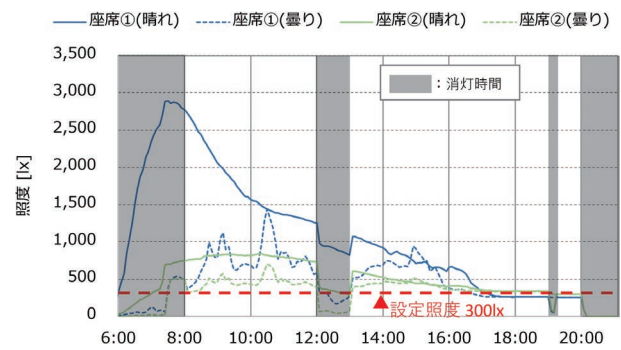


図-9 300 lx 設定時の照度の日変動

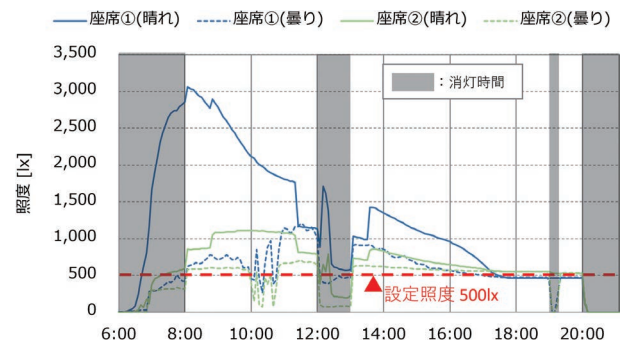


図-10 500 lx 設定時の照度の日変動

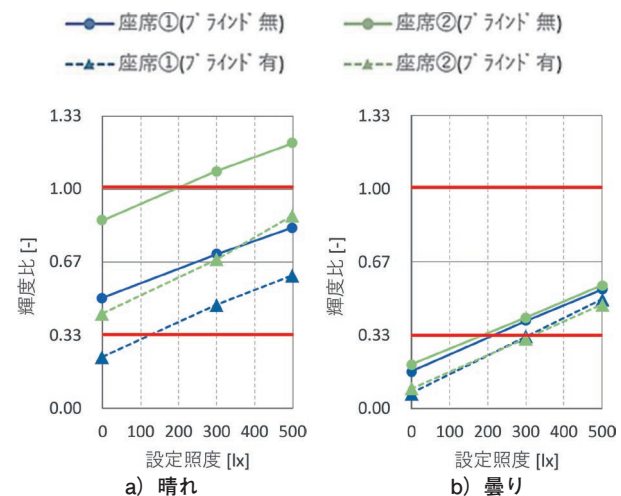


図-11 視対象 (PC 画面) に対する周辺の輝度比

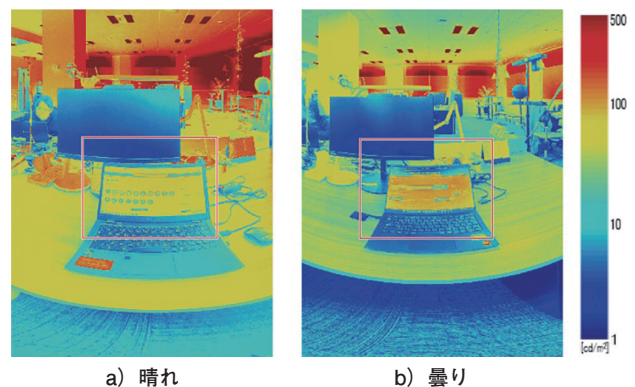


図-12 輝度分布 (座席② 300 lx ブラインドあり)

表一4 明るさ感推定値の適切さ⁸⁾

判定	明るさ感推定値の範囲
A【最も適切】	100 以上 140 未満
B【やや適切】	80 以上 100 未満および 140 以上 160 未満
C【不適切】	80 未満あるいは 160 以上

なお、明るさ感推定値には判定基準（表一4）⁸⁾があり、室用途や省エネ意識などから「空間の明るさが適切であるか」が判定できる。推定値が低い方は明るさの不足によって、高い方は省エネの観点から判断される明るさの過剰によって不適切と判定される基準である⁹⁾。

100～140 であれば省エネルギーに配慮した適切な明るさとされ、120 程度が一般的な事務室における人工照明環境の適切な明るさといえる。なお、グレア等の不具合がないことが前提であるが、表一4 の判定基準に関わらず、昼光利用であれば 140 を超えていても不適切という評価とはならない。また、80 未満の場合は、明るさの不足により暗い印象を与えるという評価となる。

(1) 有効視野について

各座席における有効視野範囲での明るさ感推定値を図一13 に示す。晴れの場合、座席の位置や設定照度、ブラインドの条件にかかわらず、明るさ感推定値が 140 以上となる。つまり、外部光環境が明るい条件であれば、対象室は非常に明るいと考えられる。一方、曇りの日も、ほとんどの場合に明るさ感推定値は 140 を超え、ブラインドを閉鎖した設定照度 300 lx のときに明るさ感推定値は 120～140 の範囲となり、適切な明るさが確保されている。

(2) 全体俯瞰について

各座席における全体俯瞰範囲での明るさ感推定値を図一14 に示す。有効視野範囲と同様に、晴れの場合は座席の位置や設定照度、ブラインドの条件にかかわらず、明るさ感推定値が 140 以上となる。一方、曇りの場合においても明るさ感推定値はほぼ 120 以上である。最も暗い条件でも明るさ感推定値は 100 を上回ることから、晴れの場合よりも暗いが、オフィスとしての必要な明るさは有しているといえる。

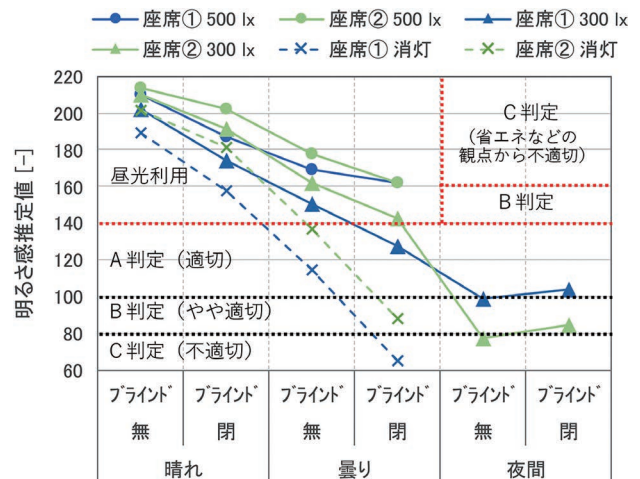
(3) 夜間の明るさ感分析

夜間における設定照度 300 lx での明るさ感推定値は、有効視野範囲での座席①のブラインド閉鎖の条件を除くほとんどの条件で 100 を下回る。全体俯瞰では全ての条件で 80 を下回る。従って、設定照度を 300 lx とすると、夜間は暗い印象を与える可能性が高い（図一13、14）。

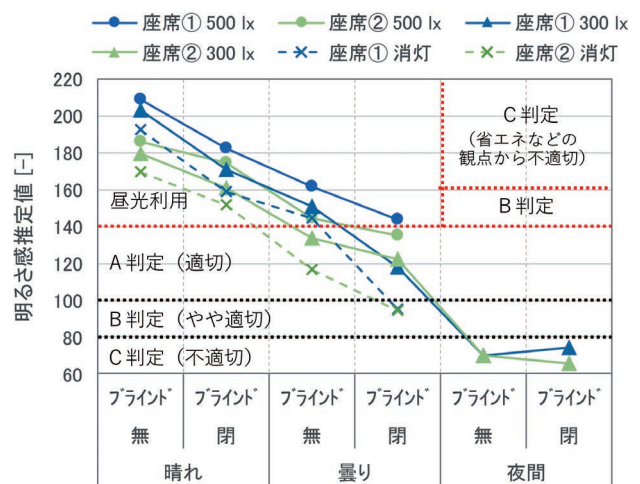
(4) 画像による詳細分析

具体的な明るさ感推定値分析の例として、図一15 に晴れの 300 lx ブラインド閉鎖での座席①、図一16 に夜間の 300 lx ブラインド閉鎖での座席①の解析画像を示す。

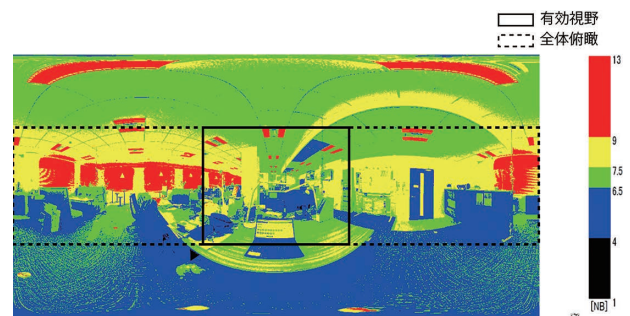
図中の青色で示される NB 値 4～6.5 の範囲は明るさ感を下げる範囲であり、床や黒色の仕上の什器や建具が該当する。また、図中の黄色で示される NB 値 7.5～9



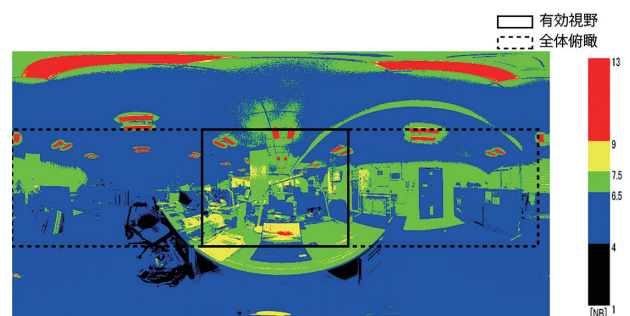
図一13 有効視野範囲における明るさ感推定値



図一14 全体俯瞰範囲における明るさ感推定値



図一15 300 lx 明るさ感画像（晴れ・ブラインド閉鎖）



図一16 300 lx 明るさ感画像（夜間・ブラインド閉鎖）

の範囲は明るさ感を上げる範囲であり、主に白色クロス仕上げの壁面が該当する。

晴れの場合には昼光の影響で壁面のクロス仕上げが明るさ感を上げる効果を発揮しているが、夜間の場合には壁面の大部分が明るさ感に寄与しない中立な領域および明るさ感を低下させる領域になっていることが確認できる。つまり、夜間においては、照明光の一部が壁面を照射するような照明配置として、壁面を中立な領域から明るさ感を向上させる領域へと変化させることが有効であると考えられる。また、壁面に次いで大きな領域である床や建具や什器が明るさ感を低下させる領域となっていることから、床材や什器などを明色にして中立な領域に変化させる対策は非常に有効であると考えられる。

3-6 低照度設計の光環境評価のまとめ

照度、輝度比、明るさ感推定値の3つの指標により 300 lx、500 lx の2つの設定照度による室内の光環境を比較した。全指標に共通して、外部から十分に採光が得られる条件では低照度の運用を実施しても好ましい光環境が確保できることが明らかであった。また、外部の光環境が曇りなどの光量が小さくなる条件では、ブラインドを開放するなど昼光を導入する環境調整によって高い明るさ感が確保できることが確認された。

一方、夜間については、設定照度 300 lx では明るさ感推定値が 80 を下回る場合が多いため、暗く感じる可能性が高いことが分かった。そして画像による詳細分析により、床や壁の仕上面・什器に明色を積極的に採用する建築的な配慮や、壁面などの視覚的に影響の大きい面に照明光が入射するような照明配置を採用する設備的な配慮が有効であると考えられた。設計照度を抑制するためには、このような手法で明るさ感推定値を上昇させて執務者に暗い印象を抱かせないための配慮が必要であることが確認された。

§ 4. おわりに

技術研究所 ZEB 設計技術実証スペースにおける「フォーカスルーム」に導入した天井放射空調の熱源往水温および流量に対する冷房性能について、「ワークスペース」における照度設定を抑制した場合の光環境の評価と設計配慮について報告した。

天井放射空調技術については、今後も室内快適性および省エネルギー性能を向上させる設計仕様の追及を行っていく予定である。また、照明エネルギーに関する取り組みについては、低照度照明と明るさ感指標を両立させる設計法を確立するため、シミュレーションによる予測と実測による検証を進める計画である。

参考文献

- 1) 大道将史他：ZEB 設計技術実証スペースにおける取り組み，西松建設技報 Vol. 46, 2023.
- 2) 大道将史他：ZEB 設計技術実証スペースにおける取り組み，西松建設技報 Vol. 47, 2024.
- 3) 日本建築学会：AIJES-L0002-2016 照明環境規準・同解説，2016
- 4) 日本産業規格 JIS Z 9125：屋内照明基準，2023.
- 5) 厚生労働省：情報機器作業における労働衛生管理のためのガイドライン，2021.
- 6) 中村芳樹：視環境設計入門一見え方から設計する光と色—数理，工学社 p. 172, p. 185, p. 188, p. 204, 2020.
- 7) IES Lightning Handbook, 2020.
- 8) ビジュアルテクノロジー株式会社：REALAPS—Omni ガイドマニュアル，2025.
- 9) 上口優美他：明るさ画像に基づく空間の明るさ感推定法の検討，日本建築学会 2016 年度大会学術講演梗概集，D，549-550, 2016.