

北海道科学大学高校

～ 寒冷地の学校で国内初のZEB Readyの実現～

第40回（2025年度） 空気調和・衛生工学会振興賞 技術振興賞（北海道地区） 応募審査資料

計画／検証 施 工	大成建設株式会社一級建築士事務所 大成建設株式会社札幌支店 高砂熱学工業株式会社札幌支店
機器 開発 検 証	協立エアテック株式会社 北海道科学大学工学部建築学科 魚住昌広

表紙+目次	00
プロジェクト概要	01
建築概要	02
寒冷地の学校建築初のZEB Ready認証と運用実績	03
外郭構造ルーバーや広葉樹を利用したパッシブ建築	04
寒冷地暖房需要に適したベストミックス熱源計画	05
排熱回収、カスケード利用、自然換気による省エネルギー	06
高温度吹出と教室の窓側環境の向上を実現する空調方式の開発	07
快適性向上をはかる6面の表面温度を整える空調方式	08
竣工後の運用実績の評価と検証（エネルギー使用量調査から）	09
竣工後の運用実績の評価と検証（アンケート調査から）	10

はじめに

本プロジェクトは、北海道札幌市の北海道科学大学が運営する大学キャンパス内へ高等学校を移設するものである。2022年10月に竣工し、2023年4月開校した。大学キャンパスに導入されている中央熱源、コージェネレーション排熱利用などは連携しないエネルギー的に独立した建物を計画した。

計画地の大学既存校舎は列柱によるシンプルな矩形の校舎群とテクスチャーのある複雑なヴォリュームの校舎群に大別されていたが、新築する高等学校校舎において、キャンパス外周部に対しては列柱によるデザイン、中庭に対してはテクスチャーとヴォリュームを合わせたデザインとすることで、キャンパス内の統合を試みた。

三角形がさまざまな「場所」をつくる新しい学校建築のプラン三角形の校舎に四角形の教室を並べることにより生まれる三角形の「場所」を生徒の活動スペースとした。廊下がなく、教室が色々な大きさ、高さの「場所」によってつながる平面断面計画は、学校建築における新しいプランタイプとなった。生徒は階段や吹抜けにより適度に見え隠れしてつながるさまざまな「場所」から好きな場所を選び、自主的な活動を始める。これは「主体的に学ぶ」という学校の教育コンセプトの具現化でもある。



写真-01 鳥瞰



写真-02 外観（北側より）

構造的には校舎棟と体育館棟の2棟に分かれる。プランがそのまま構造形式となる新しい空間であり、三角形の平面にレイアウトされた教室などがコア（耐震要素）となり、各コアをスラブで繋ぐ構造形式。コアはRC壁式構造、スラブはヴォイドスラブとすることで、柱と梁のない構造体が多岐空間を形成し、これまでにない立体的な空間を生み出している。

設備的には寒冷地で学校初のZEB Readyを取得し省エネ性と快適性を両立した設備計画を実現した。一般的な空調方式とくに寒冷地の教室では冬季の上下温度差が大きく、足元が寒い室内温度を高く設定する問題があった。

1日の授業でほとんどを過ごす各普通教室は、床冷暖房方式を採用した。冬季には頭寒足熱となる床輻射暖房により快適な温度環境の実現と、搬送動力低減による省エネルギー性の実現をはかった。また座席位置の違いによる不満率の低減をねらい、廊下側と窓側の温熱環境を整える目的で、新規開発の高誘引型ブリーズによる高温度差吹出し及び、ダクトレスコアンダー効果による外皮窓面負荷の処理を行い、床壁天井6面の表面温度を均一となるようにしている。ダクトや天吊空調機のないシステムにより天井レスの開放的な教室を実現している。

表彰の対象とした主眼点

本建物は、BELS認証制度において寒冷地（地域区分1～3）の学校として国内初のZEB Ready認証（BEI 0.48）を2021年6月に取得した。寒冷地であるため、共用部の「場所」も含め全て空調空間とする必要があり、開放的な建築空間を実現する省エネルギー方式でありながら快適性の向上を目指して計画/設計/施工および検証を行った。下記に表彰の対象とした主眼点の要旨を示す。

1. 寒冷地の学校として国内初のZEB Ready認証と運用実績
2. 外構構造ルーバーや広葉樹を利用したパッシブ建築
3. 寒冷地暖房需要に適したベストミックス熱源計画
4. 排熱回収、カスケード利用、自然換気による省エネルギー
5. 高温度差吹出と教室の窓側環境の向上を実現する空調方式の開発
6. 快適性向上をはかる6面の表面温度を整える空調方式
7. 竣工後の運用実績の評価と検証（エネルギー使用量調査から）
8. 竣工後の運用実績の評価と検証（アンケート調査から）

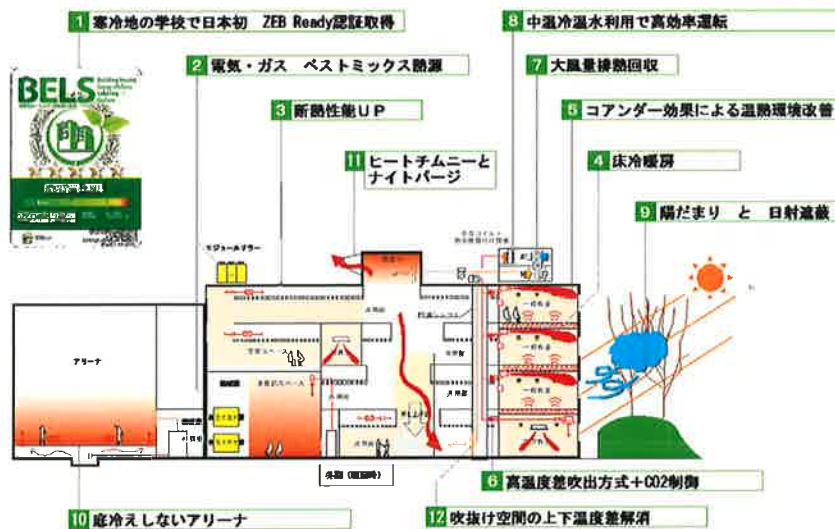


図-01 表彰の対象とした主眼点を実現する12の特徴

施設概要

■建築概要

用途：高等学校
所在地：北海道札幌市手稲区
建築面積：5,118.44m²
延床面積：13,175.09m²
階数：地下0階/地上4階、塔屋1階
最高高さ：17.50m
主体構造：鉄筋コンクリート造+鉄骨造
クラス数：8クラス（300人/学年）×3学年
施設：一般教室/特別教室/大・小アリーナ
図書館（大学と共用）/グラウンド

■電気設備概要

受変電：高圧1回線（大学既存棟より分岐）
トランス容量：1,100kVA（83VA/m²）
デマンド：280kW（21W/m²）
幹線/動力/電灯コンセント/電話/LAN
拡声装置/誘導支援/防犯警報/自動火災報知/煙感連動制御/ガス漏れ/電気時計
【特高回避】
既存大学施設はガス熱源を主体とした空調に315kWのCGSを導入し契約電力は約1,800kW程度であったが、増築に伴い手稲キャンパス全体で契約電力を抑制する為、高校棟増築は電気熱源を採用しつつベストミックス熱源や高効率システムにより、契約電力を2,000kW以下としている。

■衛生設備概要

給水：受水槽（有効36m³）+加圧給水P方式（1階WCの1部をBCP対応直結給水）
給湯：ガス瞬間/電気貯湯型湯沸器
排水：汚水雑排水屋内合流/自然汚水雨水屋外分流方式
ガス：都市ガス（低圧）
消火：屋内消火栓設備（既存より供給）
衛生器具：節水器具を採用

■空調設備概要

空調：外気処理+FCU+PAC
外調機：2段コイル（中温+通常）
+ローター型全熱交換器組込
熱源：空冷ヒートポンプモジュールチラー（高効率型散水付き/ブライン対応）
+ガス焚冷温水発生機+真空温水器
水搬送：冷水/温水切替、中温冷水/温水INVによる変流量制御
換気：高温度差吹出（夏季12℃）
CO₂制御+VAV制御による搬送動力低減
融雪：電気方式
床冷暖房：中温冷水/中温温水
自動制御/中央監視/BEMS
（維持管理に配慮し既存大学施設で監視可能）

配置計画



図-02 配置図

北海道札幌市手稲区前田にある北海道科学大学は、前身となる北海道工業大学が約50年前にこの地に工学部を創設し、地域とともに発展してきた。

法人創立100周年を迎える節目として、高校大学一体を通して、高校在学中から大学での学びを日常的に体験でき、社会で活躍できる幅広い人間力を持った人材を育成する事を目標とし、前田の大学敷地内に、豊平区中の島から移転した。

大学図書館脇にあった“森”を校舎棟、体育館棟の敷地として整備した。18,000冊を収蔵する既存図書館は大学と高校をつなぐ施設とし、高校生も利用可能な設えに改修した。

平面計画

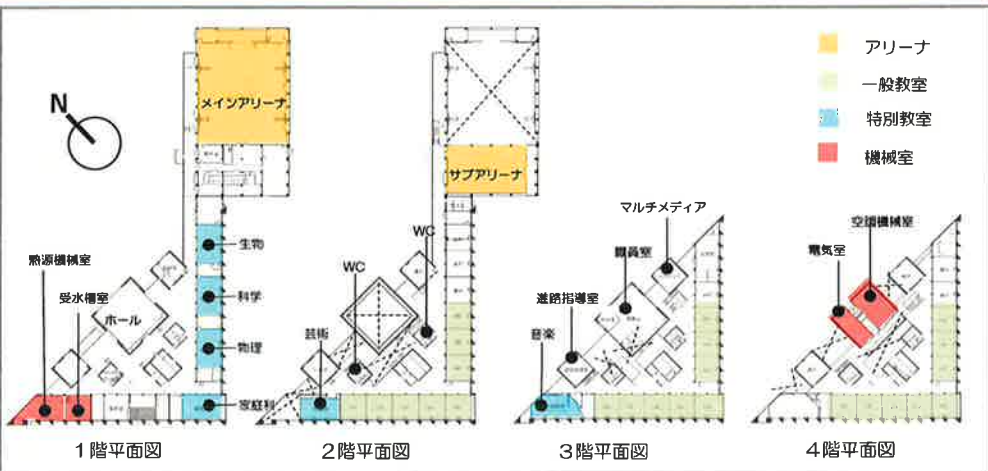


図-03 1~4階平面図

建築設計コンセプト

■対比のデザインがキャンパスを統合する

北海道科学大学のキャンパスへ高等学校を移設するプロジェクト。計画地の既存校舎は列柱によるシンプルな矩形の校舎群とテクスチャーのある複雑なヴォリュームの校舎群に大別されていた。新築する校舎において、キャンパス外周部に対しては列柱によるデザイン、中庭に対してはテクスチャーとヴォリュームを組合せたデザインとすることで、キャンパスの統合を試みた。

■プランがそのまま構造形式となる新しい空間

三角形の平面にレイアウトされた教室などがコア（耐震要素）となり、各コアをスラブで繋ぎ、柱と梁のない構造体がそのまま空間を形成し、これまでにない立体的な空間を生み出している。

■三角形がさまざまな「場所」をつくる新しい学校建築のプラン

三角形の校舎に四角形の教室を並べることにより生まれる三角形の「場所」を生徒の活動スペースとした。廊下がなく、教室が色々な大きさ、高さの「場所」によってつながる平面計画は、学校建築における新しいプランタイプとなった。生徒は階段や吹抜けにより適度に見え隠れしてつながるさまざまな「場所」から好きな場所を選び、自主的な活動を始める。これは「主体的に学ぶ」という学校の教育コンセプトの具現化である。（図-04）

構造設計コンセプト

■新しい空間を実現する構造計画

コア部分の教師室や職員室などを耐震要素とした。コアはRC壁式構造、スラブはヴォイドスラブとすることで、柱と梁のない構造体がそのまま空間を形成し、これまでにない立体的な空間を生み出している。（図-05）

設備設計コンセプト

■パッシブとアクティブ技術を融合し、Well-beingな居心地よさ

日射遮蔽と冬季の日射の取込、自然換気など自然豊かな当該地に共生するパッシブ技術に加え、春や秋に変化する冷暖房追随性など、どこでも居心地がよく活動しやすい空間を提供

■寒冷地だからこそ健康で快適な温熱環境

長時間の居場所となる各教室は、上下温度差が少なく壁床天井の6面を均一な温度とするため、床冷暖房や、新規開発の高誘引型ブリーズによる高温度差吹出し及びコアンダー効果による窓面負荷の処理を計画し冬季の頭寒足熱空間を目指した。校舎は全館空調とし、年間を通して活動や出会いを生む「場所」を提供した。（図-06）

■寒冷地で学校初のZEB Readyを取得し省エネ性

すべての一般教室に供給される外気はCO2濃度による可変風量制御や排熱回収などの無駄なエネルギーの削減に加え、中温の冷水/温水が寒冷地でも有効に使える工夫を行い、夏季、冬季に寒冷地では難しい電気/ガスのベストミックス熱源の高効率運転を実現した

三角形の校舎に四角形の教室を並べることで生まれるすきま空間を生徒の活動スペースとした

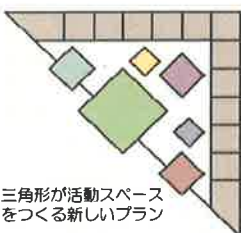


図-04 空間構成コンセプト①

「場所」の床は教室の壁により支えられ、柱と梁のない構造体がこれまでにない立体的な空間

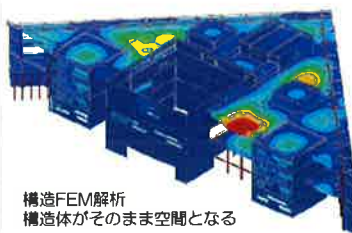


図-05 空間構成コンセプト②

生徒はさまざまな「場所」の中から好きな場所を選び、自主的な活動を始める



図-06 空間構成コンセプト③

寒冷地の学校で国内初のZEB Ready認証と運用実績

学校建築のZEB認証

2021年1月にZEB認証申請時、学校用途での登録は46件あったが、全て4~8地域の温暖な地域での登録であった。当学校は、寒冷地である1~3地域における第1号のZEB Readyの登録となった。寒冷地の学校建築は、多量な外気量導入と冬季の暖房エネルギー削減がポイントである。建設費抑制の必要性和暖房性能の確保から都市ガスを用いた暖房システムを採用したが、ヒートポンプ熱源機を併用する事で、費用対効果の高く省エネ性にも優れた建物を実現した。

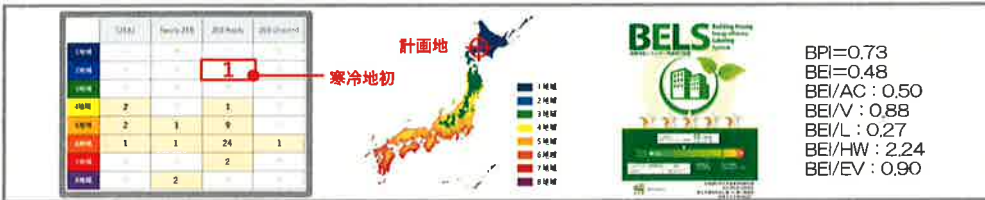


図-07 ZEB Ready認証

導入した省エネ技術

- <外皮性能> BPI=0.73 設計値305MJ/基準値420MJ
 - ・高日射遮蔽型窓 (Low-E複層ガラス・アルゴンガス封入)
 - ・高断熱 (外壁40mm、屋根75mm)
- <空調のバッシブ利用>
 - ・自然通風 (ヒートチムニー&窓開閉)
- <空調熱源・冷却塔の効率化>
 - ・高効率熱源機器 (空冷HPチャラー (取水)、吸収式冷温水発生機、真空温水器)
 - ・台数制御 (モジュール型チャラー)
 - ・インバータ制御 (ポンプ)
 - ・冷温水1次ポンプ変流量制御
 - ・冷卻水変流量制御
 - ・冷水送水5°CUP→高効率化 (空冷HPチャラー) ▲19%
 - ・温水送水5°CDown→高効率化 (空冷HPチャラー) ▲9.7%~max▲21%
- <空調機の効率化・制御の高度化>
 - ・高効率パッケージ型空調
 - ・放射空調システム (一般教室に床冷暖房)
 - ・コアンダ効果を用いた躯体蓄熱放射空調 (一般教室)
 - ・外気処理空調機 (2段コイルとし、プレコイルは空冷HPチャラー系統)
 - ・外気排熱回収 (全熱交換器)
 - ・変風量制御 (教室にCO2制御)
 - ・空気搬送動力削減 大温度差吹出 (誘引型吹出) (冷房Δt=14°C)
 - ・体育館は床チャンバー吹き出し空調 (簡易床冷暖房、居住域空調)
- <換気設備の効率化>
 - ・高効率ファン
 - ・ファンインバータ制御
- <換気制御の高度化>
 - ・CO2濃度制御
- <照明設備の効率化>
 - ・高効率照明 (LED)
- <換気制御の高度化>
 - ・人感センサーによる点滅制御 (WC)
- <給湯設備>
 - ・自動水栓
- <昇降機制御>
 - ・VVVF (電力回生あり)

BPIは0.73 BEIは0.48

表-01 BEI削減率一覧表

設備	設計一次エネルギー消費量 (G/年)	基準一次エネルギー消費量 (G/年)	削減率 (%)
空調設備	5,823.8	11,680.7	▲50.1
換気設備	472.8	488.8	▲12.4
照明設備	771.5	2,921.3	▲73.6
給湯設備	155.0	69.3	123.6
昇降機	23.7	26.7	▲11.1
その他	2,105.4	2,105.4	-
合計(その他の除外)	9,307.8	17,292.2	▲45.6
その他(その他)	7,202.4	15,186.8	▲52.6

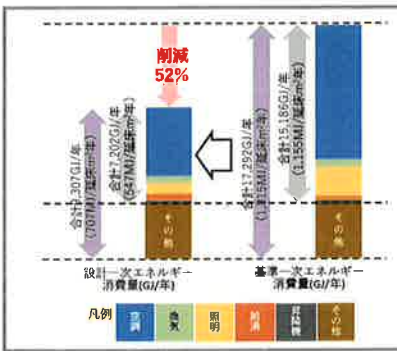


図-08 BEI削減量

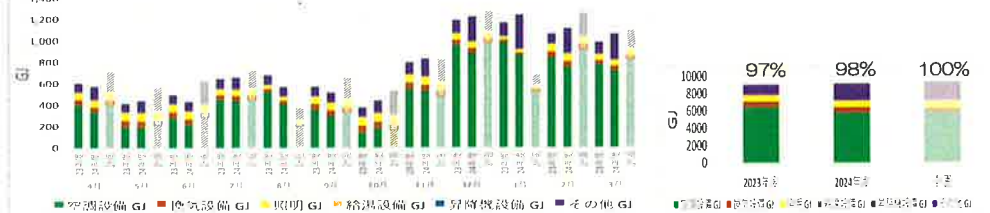
快適で利用しやすい環境づくり

旧校舎教室は、冬の窓側は寒く、ストーブの周りは暑いという同じ教室空間内でも、温熱環境が大きくとなっていた。普通教室の全30室には、上下温度差を小さくするため冷温水式の床冷暖房を採用し、廊下/窓側どちらも同じ快適な環境とすることで、冬季の頭寒足熱=眠くならない頭の良くなる教室の実現をこころみた。

普通教室には、天井カセット型空調を不要とし、床冷暖房と外調機からの空気のみで温熱環境をコントロールする潜熱分離空調を計画した。このシステムにより、寒冷地のエアコン空調で問題となる上下温度差による足元の寒さ、ドラフトによる不快感、窓面からのコールドドラフト等の欠点を改善した。室内の設計目標湿度は冷房期26°C、湿度成行、暖房期22°C、湿度40%とした。外気処理空調機により、夏季は12°C吹出しを可能とし、外皮の熱負荷は、外気処理された空気のみで処理した普通教室にはPACやFCUなどの空調機を設置しない計画とした事が特徴である。12°C95%まで冷却された空気は26°C40%と絶対湿度が同じで、除湿にエネルギーを消費しているが、不快指数は、湿度が低いと室温が高くても良好な値となることから、顕熱比が低い教室で、蒸し暑くならず、教室の冷房設定温度を上げて快適性が保たれ、かつ過冷却によるエネルギーが増える分を相殺する快適で省エネルギー性能も高い計画とした。

基準1次エネルギー消費量 (その他含む) と運用実績の比較

各月の建物一次エネルギー消費量の実績値と (WEBプログラム計算値を用いた) 計画値の比較を図-09に示す。年度合計値の比較を図-10に示す。年度合計は、計画値とほぼ同等 (2023年度: 97% 2024年度: 98%にて運用) であったが、空調エネルギーの使用量とその他は計画値より大きく、その他は小さくなる傾向となった。

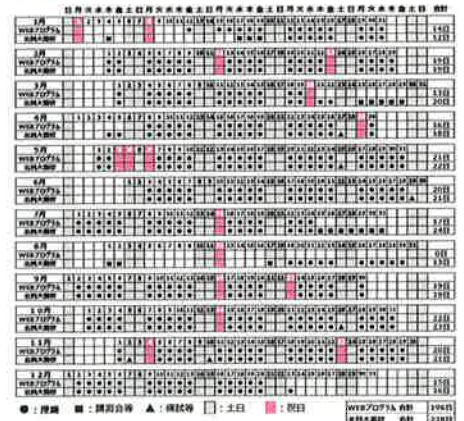


WEBプログラムカレンダーパターンとの比較検証

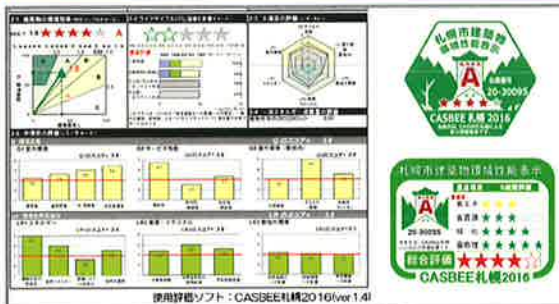
本施設の消費エネルギーは基準一次エネルギー消費量とほぼ同一となったが、運転時間について妥当性の確認を行った。WEBプログラムの高校稼働カレンダーパターンは、196日/年×8時間/日=1,568時間/年にて計算されている。北海道科学大学高校の2023年度の使われ方を調査すると、夏季/冬季休暇中も特別授業で、合計228日/年稼働している事が確認された。図-11に示す。実稼働日数で、WEBプログラム稼働パターンとの1.16倍に相当することがわかった。WEBプログラムでは、1,568時間の使用を想定した計算となっているが、BEMSデータから空調運転時間を調査し、教室系統は3,100時間/年、アリーナ系統は3,477時間/年の稼働が確認された。逆算すると、教室系統は平均13時間/日×237日稼働されていた事に相当し、稼働日数のみならず、放課後の補講授業やクラブ活動により1日の稼働時間が長いことがわかった。運動部によるアリーナ使用は、土日祝日を含め使用している事を示す。

WEBプログラム稼働パターンとの稼働日数/時間より約2倍使用されていたが、建物全体の一次エネルギー消費量は計画値とほぼ同量であった。一次エネルギー消費量は、空調、換気、照明エネルギーとも施設稼働日数/時間に比例して増加はしていない。

稼働日数/時間に比べ、一次エネルギー消費量が抑えられた要因の1つは、一般教室、アリーナともCO2濃度による外気変風量制御を入れたことにより、熱消費量と換気搬送動力が、使用時間との相関関係を示さず、省エネルギーに貢献した。また不使用時の照明消灯など学校の運用方針が徹底されていることによるものと考えられる。



建築環境総合評価



- CASBEE札幌 重点項目
- ・省エネルギー ★★★★★
 - ・高COP機器、自然換気、外気変風量制御 ★★★★★
 - ・省資源等 ★★★★★
 - ・再利用可能な部材を多く採用 ★★★★★
 - ・緑化 ★★★★★
 - ・十分な規模の緑地の保全と地域の環境配慮として外周部の緑地帯を確保
 - ・雪処理 ★★★★★
 - ・吹き溜まり対策としてGLから立ち上げのガラス部分にはロードヒーティング、腰壁を設置。雪庇対策と動線計画。

外郭構造ルーバーや広葉樹を利用したパッシブ建築

既存広葉樹を利用した 日射遮蔽と陽だまり

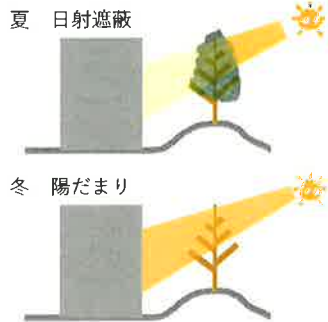


図-13 日射遮蔽イメージ

計画敷地内南東側のマウンド上に既存樹木が多数あり、計画当初から、近隣住宅と教室の視線を和らげる目的に加え、夏季の早朝、太陽高度が低い時間帯の日差しを緩和することが期待され、樹木を用いた日射遮蔽を計画した。図-13に示す。1階においては3時間ほどの日射を遮蔽する。

この樹木は広葉樹で構成されていた事で、冬季は落葉し、陽だまりによる心地よい温かさを与えることが可能となった。

視線を和らげる目的と日射遮蔽とを両立する外郭構造のルーバーとした。夏季の日射遮蔽時間は、南東、南西側ともおよそ4時間程度期待でき、また、冬季の日射取得を邪魔しない形状としている。

建物と樹木の位置関係を写真-03外観（南東側）に示す。屋間の外郭構造ルーバーによる日射遮蔽状況を写真-04外観（南東側）に示す。写真の窓に落ちる影の状況から計画通りになっている事がわかる。写真-05には、4階教室内からみた樹木側の写真を示す。夏季、教室から見える緑は、やさしい木漏れ日効果だけでなく、視覚的な心身の癒し効果も発揮する。



写真-03 外観（南東側）

写真-04 外観（南東側）

写真-05 4階教室より

縦ルーバーによる窓ガラス日陰の効果の検証

夏至、中間期（春分）、冬至のそれぞれ1日の太陽方位/太陽高度を求め、各窓に直射光が当たる時間帯を比較し、最適なルーバーの出寸等を検討した。検討にあたり、各棟の縦庇に太陽直射光が照射される角度を求めた。表-02に示す。

- ・入射開始角度：窓に日射が当たり始める時間
- ・全入射開始角度：窓に影が無く全面に日射が当たる時間
- ・正対角度：太陽が窓に対して正面にある角度
- ・遮蔽開始角度：窓に影がで始める角度
- ・完全遮蔽角度：窓に日射が全く当たらない角度
- ・縦ルーバーの形状は、夏季の日射遮蔽、冬季の日射取得による陽だまり効果、近隣への目隠しに加え、デザイン上のバランスにより、最終的に図-14に示す形状とした。

表-02 照射角度一覧表

	入射開始角度	全入射開始角度	正対角度	遮蔽開始角度	完全遮蔽角度
南東面	-112	-49	-49	-4	22
南西面	-30	-4	41	41	104

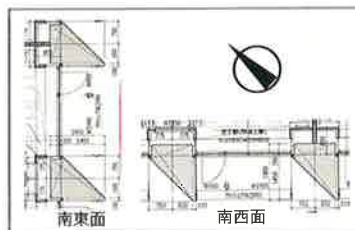


図-14 縦ルーバーの形状

樹木による遮蔽開始プロファイル角の検討

現地の状況から、建物高さと同様に樹木は同じ高さとして検討をした。窓枠上端から樹木頂点までを結ぶラインと地面の角度より低いと太陽光は樹木によって遮蔽される計算とした。（表-03、図-15参照）

表-03 遮蔽プロファイル角

南東面	樹木による遮蔽開始プロファイル角
4F	2°
3F	10°
2F	18°
1F	25°

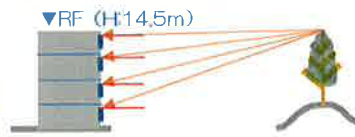


図-15 建物と樹木

各窓に日射が当たる時刻（季節別）

南西面、南東面ともに当該縦庇を設けることで、夏期に日射が窓全体に当たる時間を極力短くした。太陽が南中付近にいる時刻では、窓全面に当たった場合でも日射はペリカウンター付近に照射され、室内床への入射はすくなくなる。一方、春分や冬至では、午前中を中心に窓全体から日射が入り、特に冬期は授業が開始する時間より早い午前8時から日射が当たることで、暖房の立ち上がりにかかる負荷の軽減にも貢献する計画とした。

窓面に設置された各方位の縦庇の効果を確認するため、直射が当たる時間を季節別に図-16に示す。縦庇の形状については、このように太陽方位から各窓に直射光が当たる時間を算出し、さらに3次元モデルから日影を確認したうえで決定した。

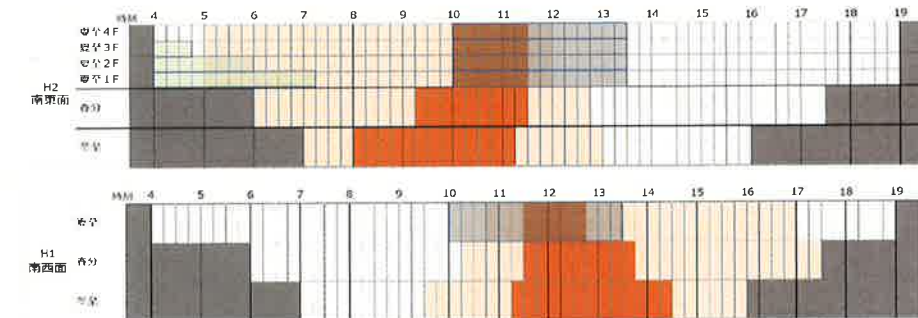


図-16 各窓に直射が当たる時刻（季節別）

- ：窓に日射が当たっている時間
- ：窓全面に日射が当たっている時間
- ：日の出前、日没後
- ：プロファイル角60°以上の太陽位置（直射はペリカウンター付近に照射）
- ：目前の樹木によって遮蔽される時間（樹木は窓から12mの位置で高さは建物高さと同程度）

夏至の南東面窓にあたる日射遮蔽

主に午前中心に日射が入る南東面には、夏期の南中に近い時間帯に降り注ぐ強い日射を防ぎ、かつ冬期の早朝からでも日射が多く入る。南西面と同様に、眺望を遮らないような、圧迫感を軽減させる平面形状とした。

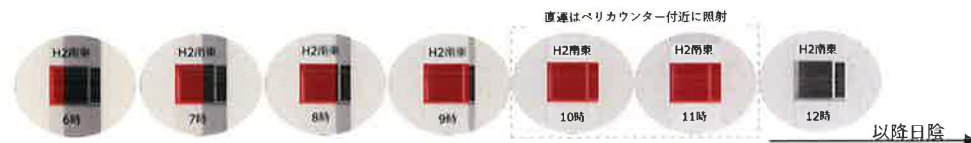


図-17 南東面窓ガラスに当たる日射と日陰

夏至の南西面窓にあたる日射遮蔽

西方向の窓からの熱負荷を考える際は、夏期の午後における窓からの日射をいかに遮るかということが課題になるが、一方で遮蔽効果高めると、冬季の貴重な日射も遮る懸念がでてくる。本件では夏期の日射をある程度遮蔽しつつ、中間期から冬期には日射が入り暖房負荷削減に貢献し、かつ眺望を遮らないような平面形状を持つ縦庇を設けている。



図-18 南西面窓ガラスに当たる日射と日陰

寒冷地暖房需要に適したベストミックス熱源を計画

本建物を計画した前田キャンパスの特高受電を回避する必要性と、寒冷地の暖房需要の大きさから都市ガスを主体とする熱源を計画のベースとした。キャンパス全体では、夏季より冬季の受電電力が大きくなる傾向があり、特に冬季におけるピークカットが可能なベストミックス熱源方式で計画した。

ZEBを目指した省エネルギー性を実現するため、1次エネルギー換算での高い効率期待出来る電気熱源の採用を検討した。建設費の問題から、寒冷な影響を受けづらい地中熱ヒートポンプの採用は見送り、空冷式を採用した。電気熱源には、空冷ヒートポンプモジュールチラー×4台、ガス熱源には吸収式冷温水発生機×1基、潜熱回収型真空式温水器×1基を設置する計画とした。

寒冷地の暖房でも、高効率かつ安定した性能が発揮できるように、熱源は冷水7℃、温水55℃の供給ができる熱源部と、空冷ヒートポンプモジュールチラーを用いた中温冷水12℃、中温温水45℃を供給する熱源群にわけて計画をした。

中温冷水/温水は、全普通教室に設置した床冷暖房と、外気処理空調機の1段目のコイルで使用することにより安定的に消費できる計画とした。

外気処理機2段目のコイルには冷水7℃温水55℃を供給し、吹出温度制御を可能としている。

表-O4 冷熱源の構成

中央熱源		個別熱源
ガス熱源	電気熱源	
冷温水発生機	真空式温水器	空冷HPチラー
422kW	349kW	230kW
55%	45%	
49%	57%	

表-O5 温熱源の構成

中央熱源		個別熱源
ガス熱源	電気熱源	
冷温水発生機	真空式温水器	空冷HPチラー
422kW	349kW	230kW
70%	30%	
56%	44%	

【冷熱源の構成】

中央熱源のみ
ガス：電気=55%：45%
中央熱源+個別PAC
ガス：電気=43%：57%

【温熱源の構成】

中央熱源のみ
ガス：電気=70%：30%
中央熱源+個別PAC
ガス：電気=56%：44%

表-O6 熱源の台数と容量

機器名称	台数	仕様
空冷ヒートポンプモジュールチラー	4台	定格能力：冷却85kW/加熱85kW 高効率型（冷却COP=6.39） 冷水：17→12℃/温水：38→45℃
吸収式冷温水発生機 高期効力型	1基	定格能力：冷却422kW/加熱422kW 冷却COP=1.46（低位発熱機） 冷水：15→7℃/温水：45→55℃
真空式温水器 潜熱回収型	1基	定格能力：加熱349kW 熱効率95%（低位発熱機） 温水：45→55℃

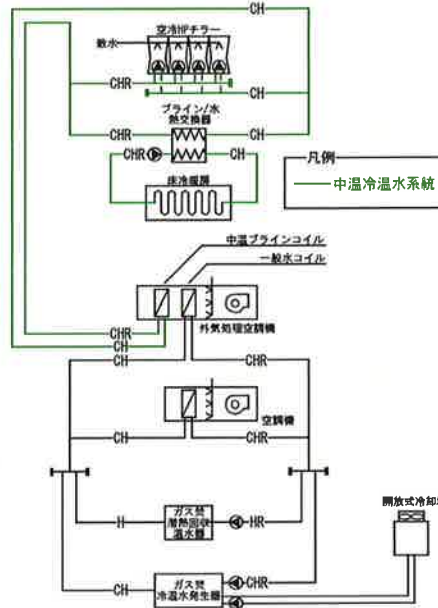


図-19 熱源フロー図

熱源設備設置状況



写真-O6 高効率空冷HPチラー

- ・屋上に設置。
- ・積雪深を考慮し基礎高さは1000hとした
- ・冬期運転に対応した防雪フードを設置。
- ・凍結対策はブラインを用いた。



写真-O7 潜熱回収温水器

- ・1階機械室に設置。



写真-O8 冷温水発生機

- ・1階機械室に設置
- ・冷却塔は屋上設置。冬季凍結対策は、冷却水を抜く対応とした。



写真-O9 ビル用マルチPAC

- ・屋上に設置。
- ・積雪深を考慮し基礎高さは1000hとした
- ・防雪フードは吐出/吸込側に設置。
- ・吐出フードは卓越風に配慮し風下側へ開放。

中温冷水/温水の利用方法

空冷ヒートポンプモジュールチラーは、氷点下となる気温では効率が低下し、デフロスト運転時の能力低下によるトラブルを防止する観点から、温水供給時はデフロスト運転時の能力が低下してもさほど問題とならない系統とする必要があった。さらに凍結防止対策としてブラインを用いる必要があり、他系統とは別系統とすることとしたため、冷水についても温水と同一系統の受け持ちとする必要があった。

また、ガス焚冷温水発生機に比べ空冷ヒートポンプチラーは、中温の冷水・温水供給時は効率が高い特性があり、デフロスト運転時の影響が少なく中温の冷水・温水が使用可能となる条件を満たす供給先として床冷暖房輻射空調および、外気処理空調機2段目コイルの1段目に使用する計画とした。

中温の温度設定は、運用しながら床冷暖房の設定温度を優先し決定する計画とした。床冷暖房供給温度に合わせた残りの空冷ヒートポンプチラーの熱源容量は、外気処理空調機の1段目コイルで外気の予冷予熱に使用し、ガス熱源より優先的に消費可能な計画としている。

冷水の温度設定とチラーCOPの向上

チラーからの1次側送水温度の設定は、床冷房用プレート熱交換器以降2次側床冷房送水温度を16→18℃としたことから、12→17℃とした。この中温冷水12℃を外気処理空調機のプレ冷却コイルとしての1段目コイルで使用し、全熱交換機で熱回収後28.2℃の外気を最大18.2℃まで下げることが可能な設計とした。高温度差搬送外気処理空調機の吹出し温度は12℃まで下げられる想定をしている。

チラーの送水温度を一般的な7℃から12℃にする事で、COPは19%の向上を期待した。

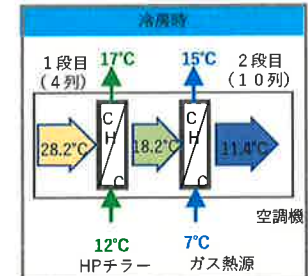


図-20 外気処理（冷房）

温水の温度設定とチラーCOPの向上

チラーからの1次側送水温度の設定は、床暖房用プレート熱交換器以降2次側床暖房送水温度を43→38℃としたことから、45→38℃としたが、床暖房の設定温度の調整によって、この送水温度を下げて運用できる事を期待した。

チラーからの送水温度を50℃から45℃にする事でCOPは9.7%向上、さらに40℃まで下げられればCOPは20.9%向上させる事が可能となる。

床設定温度は、快適満足度調査など、輻射温度と空気温度のバランスに影響されてくるため、運用時の設定温度見直し項目の1つとした。

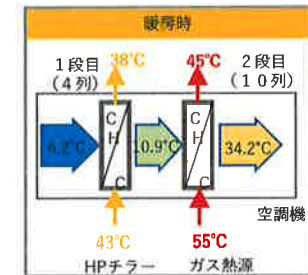


図-21 外気処理（暖房）

全熱交換機採用による無駄なエネルギーの削減

教室棟の必要外気風量は41,000m³/hで、トイレなどからの局所排気が11,500m³/hが必要となった。残りの29,500m³/h（72%）は、排熱回収を行うローター型全熱交換機組込外気処理空調機とし、外気負荷削減をする計画とした。系統は、次ページ図-22 教室棟の空調フロー図を参照。

建設コストを抑制するため、教室棟は2台の外気処理空調機にて処理する計画とした。トイレなどの局所排気を受け持つ1台目（11,500m³/h）はベース運転用とし、2台目（29,500m³/h）は、教室などの外気を受け持ちCO₂濃度による変風量制御に追従するものを計画した。2台の外調機は4階の平面的に中央に位置する機械室にまとめて設置する事で、熱源の配管長を削減しながらダクトワークも短くした。

ローター型全熱交換機組込外気処理空調機は、外形寸法が大きく、特に高さ方法を納めるため、最上階設置とし、はと小屋形状に機械室階高を確保し、その高さを利用し屋上に給気ガラーを設置している。



写真-10 外気処理空調機

共用部は空調空気のカスケード利用

廊下などのコア部分の共用部および吹抜け部は、教室からの排気される2次空気のカスケード利用により室温を維持する計画とした。各一般教室の新鮮外気は、CO2制御により、250~1,150 m³/hにて可変される。教室から廊下へのバス空気は、教室前後2か所にバスタクトを設けることにより計画をした。ダクト抵抗により出入口引き戸からの風切音の発生と、教室の音漏れ対策に配慮し、風速1.5m/sの消音ボックス併用バスタクトを設置した。教室引き戸を開めた場合でも、バスタクト抵抗による扉隙間の風切り音の発生防止と音漏れに対しても問題がないことを確認している。

共用部のガラス窓に面する学生の溜まり空間や打合せコーナーなどの空調負荷については、FCUによるスポット空調処理とした。ノズル吹出口により窓ガラス面へ吹き付けることで、窓ガラス近傍の快適性を確保した。

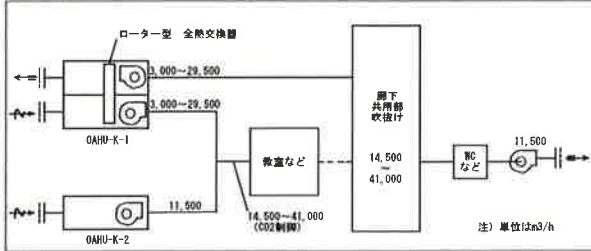


図-22 教室棟の空調フロー図

カスケード利用空気のエアフロー

外気処理空調機は2系統とした。2台の空調機からのダクトは、機械室内で統合し必要箇所へ供給している。教室の換気を受け持つOAHU-K-1は、CO2制御による可変風量制御と、排熱回収を受け持ち、WCなどの局所排気を受け持つOAHU-K-2は、ベース運転用とした。2台に分けることにより、局所排気風量との連動制御を簡潔にし、運転管理を容易としている。

吹抜によりつながった空間の上下温度差の解消

1~4階までの全フロアを吹抜けでつながった一体空間構成の構成をめざす建築計画に対して、当初から上下高さ17mの吹抜による上下温度差が大きくなる事が懸念された。冬季の上下温度差解消には床暖房が効果的であり、1階共用部へ床暖房の設置を提案したが、建設費抑制のため中止となった。そこで、少しでも温度差を縮小するために、余剰空気の排気を、季節により吸込ガラリを上下位置可変とする制御とした。CO2制御により余剰空気量は可変し、最小風量14,500m³/h~最大風量41,000m³/hとなる。これは1.5~3.8回/hの換気量に相当する。



図-23 冷房時の夏季モード2時



図-24 暖房時の冬季モード時

【夏季モード①】

4階上部の階段バントハウスの熱溜まり部から排気を取り、上部の暖かい空気層を上昇させ影響を軽減する計画とした

【夏季モード②】

4階上部の階段バントハウスの熱溜まり部の温度>外気温度となった場合には、全熱交換機ローターを停止し、熱交換せずに排出する計画とした。

【冬季モード】

1Fに設置のガラリから全量の排気を取り、全熱交換機により排熱回収を行っている。

検証結果

【夏季】

1Fと4F最上部の温度は同程度の温度となり、快適な温熱環境となっている。

【冬季】

2F~4Fに比べ1Fは1~2℃低い温度に抑えることができた。1F教室の使用頻度の少なさと空調停止の影響が大きいと考える。排気を最下部からとることで、冷気溜まりを緩和したが、床表面温度は15℃程度にとどまる結果となった。

チムニー効果を利用した自然換気による熱溜まり排除

札幌の気候は東京などに比べ涼涼であり、日本の中でも自然換気が可能な時間が長く恵まれている。気象データの日最高気温(月平均値)、日最低気温(月平均値)から、自然換気が有効な期間は、5~6月、9月の中間期で、日中および夜間とも自然換気が有効である。また7,8月の夏季は、昼間は冷房運転が必要になるが、夜間空調を行っていない時間帯に自然換気が有効であることが図-25よりわかる。自然換気条件にあてはまる日中および夜間に、4F上部の熱溜まりの熱気を効果的に排出する計画とした。

自然換気窓は、表-05に示す自然換気条件に合致した場合に自動で窓の開閉が行われるように自動制御している。

表-05 自然換気条件

・外気温度 <	室内温度(4階)
・外気温度 >	外気下限温度(15℃)
・外気エンタルピ <	室内エンタルピ
・外気露点温度 <	設定値(18℃)
・降雨なし	

※すべての項目が成立したとき有効と判断

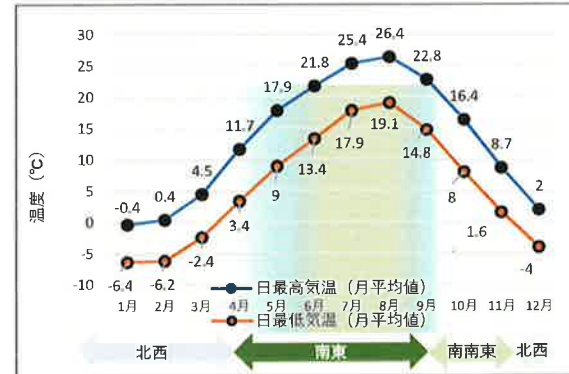


図-25 札幌気象台データ

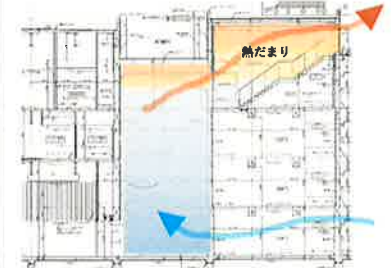


図-26 チムニー効果による自然換気概念図

底冷えしないアリーナの空調

寒冷地のアリーナは、冷えた床を通常の空調で温める事は困難である。また、外壁からのコールドドラフトにより、特に冬季の全校集会利用時や卒業式など底冷えが激しく不快な空間となる。

そこで、アリーナの床の二重床内を空調空気を通し、床板の表面温度を温め、室温に近い床温度を実現した。夏季は冷放射により効果的な居住域空調を可能としている。

また、2重床内を通した空気は、外周部の床に設けたグレーチングから吹き出す計画とした。夏季は壁面中央部のレタンガラリ以下の居住域空調とし、冬季は外周部から吹き出すことで、外壁からのコールドドラフト防止をはかり、14.6mの高さのアリーナの上下温度差を冬で、1.6℃とすることができた。



写真-11 冬季(外気温度-8℃時)状況

表-06 冬季上下温度差測定結果

測定点	温度
壁面上部表面温度	17.9℃
壁面中央部表面温度	18.8℃
床 表面温度	19.3℃
床 グレーチングの吹出温度	21.3℃



図-27 空調概念図



写真-12 床下ダクト設置状況



写真-13 床吹出口

高温差吹出と教室の窓側環境の向上を実現する空調方式の開発

外調機による大温度差空調／搬送動力を29%削減

床冷暖房のみでは室内負荷を処理しきれないため、外調機で補う計画としている。外調機の吹出温度を、一般的な温度に比べ冷房期は低く、暖房期は目標室内温度より高く（冷房時12℃、暖房時25℃）吹き出す計画とし、外調機で外皮負荷の処理ができるようにした。

誘引型吹出口は廊下側のスラブ面直下に計画し、吹出空気はコアンダ効果により窓側まで到達させ、窓・外壁の負荷を処理する計画としている。また、天井レスの建築計画であることから、誘引型吹出口及びボックスは露出設置となることを考慮し、建築計画に馴染むような形状・色を計画した。（写真-14、15参照）

また、教室内にCO₂センサーと温度センサーを設置し、CO₂・温度のうち要求値の大きい方に合わせて風量可変する計画とした。1教室あたり、250m³/h～1,150m³/hの範囲で風量可変制御を行う。これにより、無人時・低負荷時は風量の低減が可能である。

外調機の大温度差空調を採用したことで、搬送動力の削減、ダクトサイズの低減が可能になり、また冷房期は強力な除湿が可能になり快適性が向上すると考えられる。また、ダクトレスコアンダ効果による空調は、ダクト（資源量）削減に貢献している。



写真-14 高誘引吹出ユニット



写真-15 教室への設置状況

高誘引比（40%）の吹出ユニットを新規開発

搬送動力の低減と夏季の外壁（窓）負荷の処理には外気処理空調機からの吹出温度は12℃とする必要があった。冷房時に12℃吹き出しとする場合、制気口での結露が懸念されたため、誘引型吹出口を新規に開発した。吹出口の誘引比は40%とし、誘引後の空気温度は16℃以上になるよう計画した。吹出口の結露対策についても検討した。また、コストや見栄え上からユニットのサイズは極小小さく、薄くすることとした。

検討項目は、大きく5つあり、①均一な風を吹き出す吹出BOXの形状 ②誘引性能を大きく作用するノズル寸法（吹出風速）、③誘引された室内空気と混ざる混合BOX、④室内空気の吸入口、⑤吹出口形状について検討/試作/検証を行った。

誘引ユニットの形状決定と性能検証

誘引比40%はかなり高い目標設定であったが、複数パターンの試験機を作成し、都度確認を行いながら、最終的に図-28に示す形状とした。

②のノズル吹出風速は、6m/s（1,800mm×15mm）
④の吸入口の平均風速は0.5m/s
⑤の吹出口は混合空気がきれいに流れる1800mm×99mmとした。実験による計測で、誘引比41%となる事を確認した。表-07に室温と外気処理空調機からの吹出空気による混合温度（計算値）を示す。

高速で吹き出すノズルからの騒音値も懸念されたが、無響音室での騒音検証を行い、33dB(A)以下、静圧損失も34Paとなり、所定の性能を満たす誘引吹出ユニットである事を確認した。

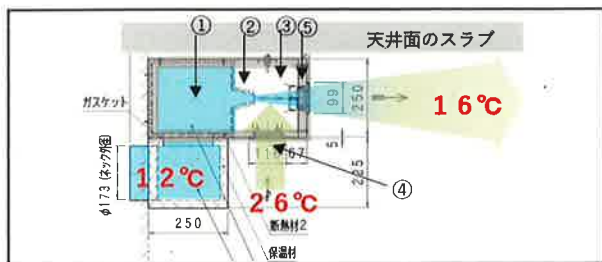


図-28 高誘引比吹出ユニット

表-07 吹出温度早見表

外気処理空調機温度 (°C)	室温 (°C)		
	26	27	28
18	20.3	20.6	20.9
17	19.6	19.9	20.2
16	18.9	19.2	19.5
15	18.2	18.5	18.8
14	17.5	17.8	18.1
13	16.8	17.1	17.4
12	16.1	16.4	16.6



写真-16 誘引比試験状況

コアンダの効果の実証実験

廊下側天井に設置される高誘引比をもつ外気処理空調機からの吹出空気は、主に外皮負荷を処理する必要と、外壁（窓）面の表面温度を室温と同程度とする計画から、吹出口から8.5m離れた外壁側へ、冷房時の冷気、暖房時の暖気とも気流が到達する必要がある。

吹出口メーカーの実験施設にて、教室を模した空間での気流可視化実験を行った。誘引比40%を満足する開発した誘引吹出ユニットからの吹出風速0.9m/sは、コアンダ効果により、外壁（窓）面まで、想定通りの到達するのを確認を行った。

特に、冷房時の冷気はスラブに引き寄せられる効果との密度差から下降する力により、スラブから剥離する位置が重要となる。また、吹出した空気は周囲との混合により、下降する力が減少し、天井面に近い上部を進んで外壁（窓）面に到達することを期待した。

冷房時の検証

夏季に行われた冷房時の到達実験は、パッケージ空調機からの吹出温度を安定的に16℃に保つ事が困難であるため、ユニットからの吹出温度差 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ となるように温度帯をシフトし、室温：34℃／吹出温度：24℃の条件にて実験を行った。図-29に計測結果と実験の様子を示す。

風速計により残風速が、0.5m/s、0.25m/sの位置を計測し、想定気流のプロポジションとして描いた。発煙気流による目視によっても、ほぼ同様な形状である事を確認している。

およそ7m進んだところで、残風速が0.5m/sとなり上部天井面から剥離が始まる事がわかった。目標到達距離8.5mの地点では、残風速0.25m/sで、外皮面に気流が到達しつつも、窓際に座る学生ヘッドドラフトを感じさせない良好な気流である事を確認した。

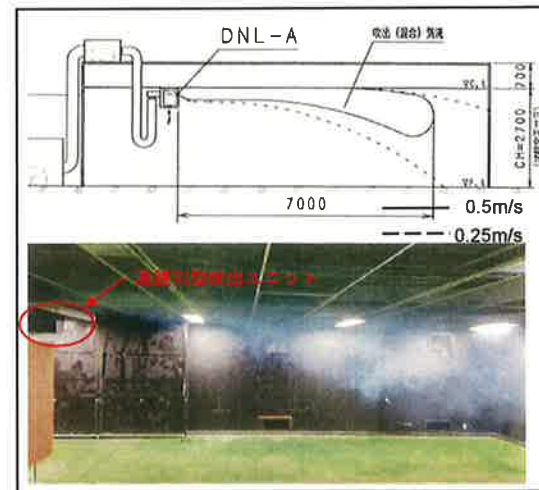


図-29 冷房時の計測結果と実験の様子

暖房時の検証

暖房時の到達実験は吹出ユニットからの吹出温度25.6℃とし、実験室内を23.5℃に保ち、吹出温度差 $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$ となるように実験を行った。図-30に計測結果と実験の様子を示す。

室温より温度が約3℃高いために、気流は下降せず、周りの空気と混合しながら徐々に気流の体積を増しながら外皮方向へ想定通り進むことが分かった。

風速計により残風速を計測したが、空気塊の流れ中心部は0.5m/s、空気塊の剥離される周囲は0.25m/sとなった。発煙気流による目視によっても同様な様子が確認できた。

冬季の実際の教室では、外皮面に気流が到達し、外壁／窓の負荷を処理し、外壁に沿って気流が下降する事が想定された。外壁、窓表面温度を温めることで、温熱感の向上と、コールドドラフト防止を図る考えとした。窓面のコールドドラフトについては、次ページの気流の検証を参照。

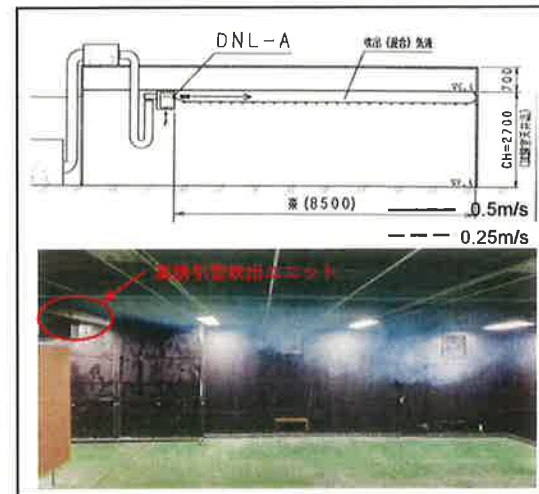


図-30 暖房時の計測結果と実験の様子

快適性向上をはかる6面の表面温度を整える空調方式

快適性向上のために 6面の表面温度を整える空調方式概要

教室の快適性を向上させるため、床、天井、外壁（窓）、内壁など、6面の表面温度を極力室温に近い状態にすることに注力した。①床表面温度：床冷暖房を導入。②天井：コアンダ効果による気流によりスラブ温度を冷却/加温する。③外壁（窓）：気流を積極的に外壁（窓）へ吹き付ける。窓にはアルミ製ブラインドを設置する事で、窓面からの輻射熱軽減効果を目指す。④内壁：空調された隣室側に加え、廊下側内壁も廊下にバス空気を流す事で、温度差を少なくし、室温と同様な均一な壁面温度を目指す。

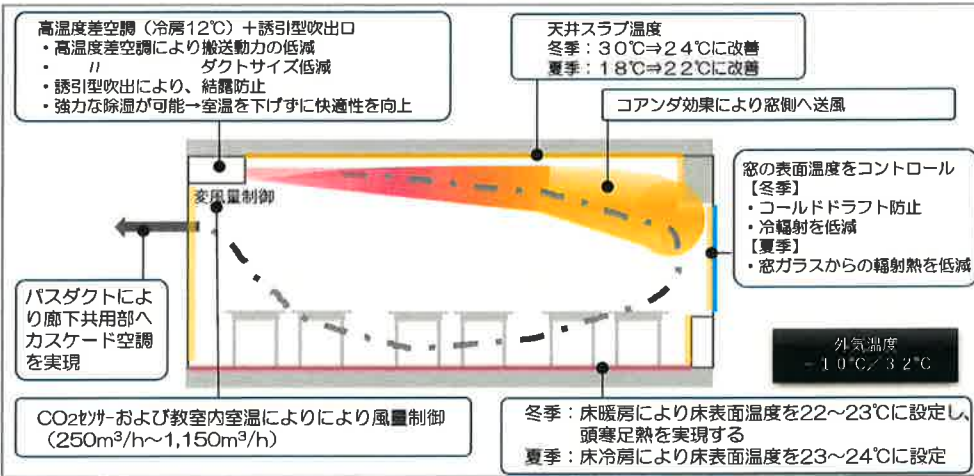


図-31 6面の表面温度を整える空調方式

コアンダ効果による外皮負荷処理の検証

コンセプト通りの気流になっているか、可視化により確認を行った。教室に黒の構造紙を貼り、サーモグラフィによる確認を行った。撮影に当たっては、長時間空調を行っている時と壁床天井の表面温度が均一となってしまう気流が確認できない為、撮影は教室床壁天井が十分に冷えた状態から空調を稼働させて気流の可視化をおこなっている。開演時に試験場で行った気流と同様な性状であることが確認できている。

- ①コアンダ効果により、天井スラブに窓面まで気流が到達していることが確認できる。
- ②窓面に暖房空気が到達し、窓表面温度を上昇させている。（写真-18の窓はブラインド閉状態）
- ③スラブ表面温度が、吹出温度により加温されている
- ④徐々に気流が広がり（下降し）、風速が徐々に落ちている

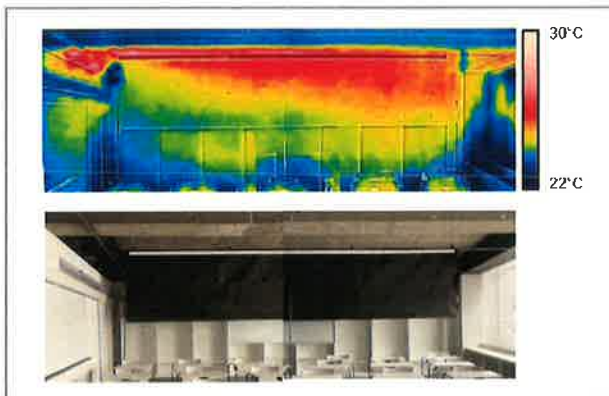


写真-17 (上) 暖房運転測定中（黒い紙を上部に設置）
 (下) 暖房運転測定中のサーモグラフィ

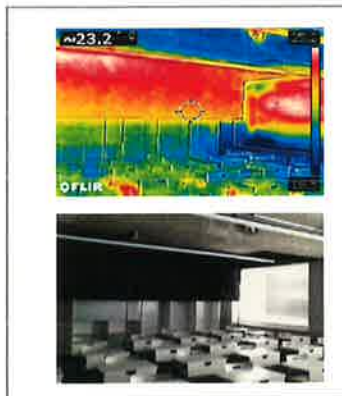


写真-18 (上) 暖房時窓面
 (下) 窓面の加温状況

ドラフトを感じない気流感の検証

竣工後、2022年12月14日に2階の普通教室内の温度と気流の測定試験を行った。外調機・床冷暖房を暖房運転で稼働し試験を行った。測定時の外気温は-2℃、天気は曇り、測定当日は8時から空調稼働し、測定は10時から行った。測定は外調機の吹出風量最大時（1,150m³/h）、風量最小時（250m³/h）の2種類行った。室内温度測定および表面温度は熱電対を用いて自動ロガーにより記録し、風速については風速計を用いて人力で計測した。写真-19参照
 室内温度は床直近、上下中間、天井直近を計測し、表面温度は床温度、天井温度、外壁の温度、ガラスの温度を計測することとした。測定点を図-32に示す。



写真-19 測定風景

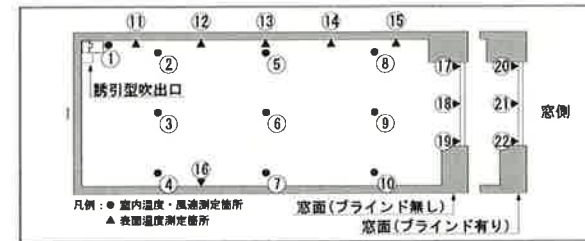


図-32 測定点断面イメージ

定常状態における室内温度の計測結果を表-08に示す。①31.2℃で吹き出された空気は、徐々に周りの空気と混合され温度が低下し②の地点では25.6℃まで下がるが、室中央から外壁までは⑥24.2℃、⑦24.8℃とほぼ均一な温度となった。教室中央⑥と⑦・窓側は上下温度差1.5℃以下であった。計測点2,5,8及び図5より、コアンダ効果により窓際まで気流が到達できていることが確認できた。居住域では気流は微小であり計測不可であった。

表-08 室内温度

測定箇所	測定箇所名称	最大風量時		最小風量時	
		温度(℃)	風速(m/s)	温度(℃)	風速(m/s)
1	誘引型吹出口直近	31.2	2.8	22.4	0.63
2	廊下側上部	25.6	1.1	21.6	0.22
3	廊下側中部	24.9	※	21.5	※
4	廊下側下部	22.8	※	22.1	※
5	中央上部	24.2	0.53	21.8	0.14
6	中央中部	22.6	※	21.5	※
7	中央下部	22.7	※	21.9	※
8	窓側上部	24.8	0.13	21.9	0.08
9	窓側中部	24.7	※	21.5	※
10	窓側下部	23.8	※	21.6	※

※測定器下限以下の風速のため測定不可

表-09 表面温度

測定箇所	測定箇所名称	最大風量時	最小風量時
		表面温度(℃)	表面温度(℃)
11	上部スラブ表面-1	24.3	21.6
12	上部スラブ表面-2	21.8	21.6
13	上部スラブ表面-3	21.2	20.6
14	上部スラブ表面-4	20.8	20.3
15	上部スラブ表面-5	19.8	19.4
16	床表面	21.1	21.6
17	窓面ブラインド無し上部	19.4	17.2
18	窓面ブラインド無し中部	19.2	17.2
19	窓面ブラインド無し下部	17.4	16.6
20	窓面ブラインド有り上部	24.3	19.9
21	窓面ブラインド有り中部	23.9	19.7
22	窓面ブラインド有り下部	19.6	17.3

定常状態における表面温度の測定結果を表-09に示す。天井表面温度は、計測点11は吹出空気の影響を受けていると考えられ、計測点12〜15については室温との差が1℃程度であった。計測点12〜15は最大風量時のほうが最小風量時より0.5℃程度高い結果となった。実測により上下温度差が低く、表面温度が均一でドラフト感のない教室が実現できていることが確認された。

床、天井、外壁（窓）、内壁表面温度の検証

【夏季の状況】

- ・壁、床、天井の表面温度が均一であることがわかる。写真-20参照。
- ・ブラインド：右は閉、左は開の状態である。ブラインドは開閉どちらでもコアンダ効果による気流が到達し、窓面からの熱放射を軽減していることが確認できる。
- ・天井面の黄色部分は、照明器具の影響である

【冬季の状況】

壁、床、天井の表面温度が均一である事がわかる。写真-21参照。窓面については、アルミ製ブラインドを光が入る程度（斜め4.5度）に傾斜させ、下すことで、表面温度は室温と同程度となり、冷輻射を防止する効果は大きい事がわかる。また窓からのコールドドラフトが発生していない。

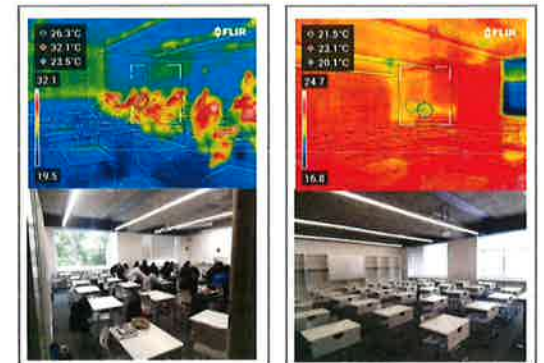


写真-20 普通教室（夏季）

写真-21 普通教室（冬季）

運転実績

気象条件と冷暖房運転

建設地は夏季は冷涼で過ごしやすく、冬季は寒冷の気象で長期間暖房が必要となる。寒冷地の学校建築では暖房が主体であることが多いが、昨今では温暖化の影響により、夏季の昼間に冷房運転が必要となる日が多くなっている。1991～2020年度の年平均値では、真夏日（30℃以上）となる日は平均8.6日、夏日（25℃以上）は54.6日であるのに対し、真冬日（最高気温<0℃未満）は43.6日、冬日（最低気温<0℃）は121.8日となっており、冬日は夏日の約2倍である。これにより暖房熱源の高効率化が重要であることがわかる。

空冷ヒートポンプモジュールチラーによる暖房運転は、燃焼を伴う熱源機器に比べCOP（1次エネルギー換算）が高く、省エネルギーであるが、低温の外気はCOP低下を招き、寒冷地でZEBを目指すプロジェクトの中央熱源としての採用事例は多くない。

冷暖房の運転管理

運転管理が容易な空冷ヒートポンプチラーをベース運転機として、冷暖房を行う計画とした。またガス熱源併用により、建設費の抑制に加え、変動する燃料単価への対応、特に低温の外気条件でも安定した暖房性能を確保した。電気熱源、ガス熱源の選択によって、省エネルギー性、経済性が変わるが、運用上の工夫の余地を残した。

本施設が立地する札幌市では、5月の連休（GW）明けから夏日が出現し、10月中旬くらいまでが冷房期間、以降年度の5月の連休（GW）までが暖房運転となると言われている。本施設における2023年度、2024年度の熱源の冷暖房切替え運転の実績について表-10に示す。

表-10 熱源の冷暖房切替日時

年度	空冷HPチラー	冷温水発生機	真空温水機
	2023年度	6/15：暖房→冷房 10/23：冷房→暖房	5/15：暖房→冷房 10/20：冷房→暖房
2024年度	5/16：暖房→冷房 5/21：冷房→暖房 6/3：暖房→冷房 10/10：冷房→暖房	6/9：暖房→冷房 10/8：冷房→暖房	通年暖房

冷暖房エネルギー消費量

毎月の冷暖房エネルギー製造量

各月各熱源の冷温水製造量を図-33,34に示す。2023年度を例にとると、冷房期は、6月～9月（5月、10月も少量の冷房運転有り）の4か月（1,024GJ）、暖房期は、10～5月の8か月（3,188GJ）となり、暖房エネルギーの占める割合は、年間のエネルギー消費量の76%となった。冬日の日数を、夏日と冬日の合計日数で除すると69%であり、外気温との相関性が確認できる。

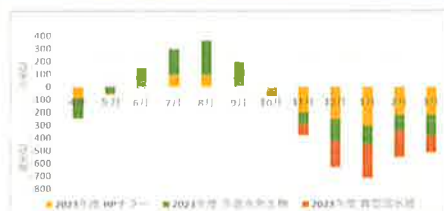


図-33 2023年度月別エネルギー製造量

年間の冷暖房エネルギー製造量

年間に製造した各熱源の冷温水製造量を図-35,36に示す。冷水の計画電気熱源比率45%に対して実績は約30～35%、温水の計画電気熱源比率30%に対して40～41%という結果であった。

冷房運転は、年間のガス使用量に対する夏季のガス使用量割合により、割引が決定される料金体系からガス熱源を優先的に使用し、ガス使用量が増えることに加え、床冷房能力は設定温度の問題から、床暖房能力の半分程度となることも影響していると考えられる。

逆に暖房運転は、室温を下げ、床設定温度を上げる運用で省エネルギーを目指しており、床暖房に使用している中温温水は計画通り消費され、外気処理空調機の1列目コイルに用いられている中温温水も、夏季に比べ冬季の外気との温度差が大きいため電気熱源が有効に消費されたと考えられる。

2023年度に比べ2024年度は、適正な温度設定や熱源運転方法の変更により、中央熱源の使用量は減少しているが、建物全体のエネルギー使用量は凍結防止ヒータの消費電力増などで、変わっていない。

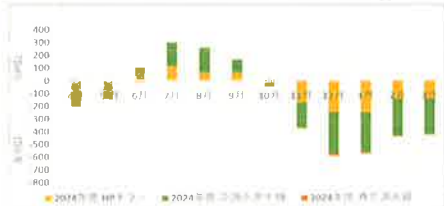


図-34 2024年度月別エネルギー製造量



図-35 2023年度熱製造量



図-36 2024年度熱製造量

システムCOP（1次エネルギー換算）の検証

今回導入した各熱源機器の定格システムCOP（1次エネルギー換算）を表-11に示す。各月各熱源の運用実績システムCOP（1次エネルギー換算）を図-37,38に示す。また、年平均各熱源の冷温水製造のシステムCOP（1次エネルギー換算）を図-39,40に示す。

表-11 各熱源機器定格システムCOP(1次エネルギー換算)

熱源	冷水	中温冷水		温水	中温温水
	7℃	12℃	15℃	45℃	40℃
	外気温25℃時		外気温-5℃時		
空冷HPモジュールチラー	1.70	2.01	2.16	0.84	0.89
冷温水発生機	1.20	-	-	0.85	-
真空温水機	-	-	-	0.84	-

空冷ヒートポンプモジュールチラーは、年間を通してガス熱源機よりシステムCOP（1次エネルギー換算）が高く、寒冷地かつ空気熱源ヒートポンプであっても有効であることを示している。また、中温温水製造におけるシステムCOP向上は、計算値より中温冷水は低いが、中温温水は高い値を示し、外気温により上下するが約1.3～2.0倍、平均で約1.46の高効率運転を行ったことがわかった。

冷温水発生機は高期間効率型を採用したが、冷房部分負荷時の機器COP向上効果に比べ、1次ポンプ、冷却塔ファン動力が大きく、定格システムCOPの約0.8倍となった。暖房運転には冷却塔補機動力が不要なため、定格システムCOPの約0.93倍となっている。

真空温水機は、2023年度は定格システムCOPに対して約0.9倍となった。冷温水発生機と同様、部分負荷時の1次ポンプの消費電力による低下が原因である。2024年度は運転管理上の問題から冷温水発生機を優先的に運転したことにより、前年度に比べ温水製造量は10%程度と少なく、システムCOPが低い値を示した。

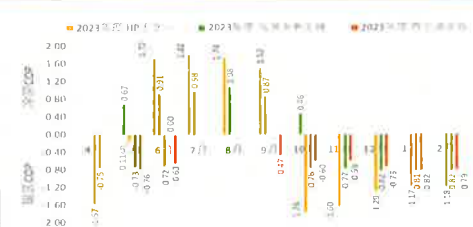


図-37 2023年度熱源毎システムCOP (1次エネルギー換算)

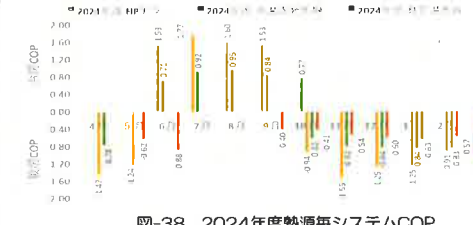


図-38 2024年度熱源毎システムCOP (1次エネルギー換算)



図-39 2023年度平均システムCOP (1次エネルギー換算)

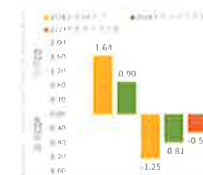


図-40 2024年度平均システムCOP (1次エネルギー換算)

運用改善

空調温度と床冷暖房設定温度チューニング

初年度夏季運転終了後にアンケート調査を行ったところ、「暑い」という意見が多く原因調査を行った。外気処理空調機の最低吹出温度が、設計値12℃に対して16℃で運用されていることがわかった。2024年度は設計通りの吹出温度は12℃まで下がる制御に戻し、建物全体の夏季の「暑い」という不満は解消された。

校舎は1～4階までの中央部の雁行した吹き抜けで一体空間となっており、上下温度差が懸念された。初年度の床冷房設定温度は、各階24℃に統一し運転を開始したが、上階に行くほど暑く感じる人が多いことがアンケート調査から把握された。同様に床暖房設定温度は、23℃に各階統一し、空調の設定温度を変更する運転を試みたが、各教室の空気温度は床温度に支配されることがわかり、教室空気温度はオーバーシュートを起こしていた。

そこで、次年度から床冷暖房設定温度を見直し、冷房：4階20℃/3階21℃/2階22℃、暖房：4階21℃/3階22℃/2階23℃と階毎に1℃のステップを設けることで温熱感の違いは小さくなり、不満足度調査では階の違いはほとんど見られなくなった。各温度設定を表-12,13に示す。

中温冷水・温水の設定温度の変更

中温冷水の送水温度は、2023年度は15℃から始め14℃とした。床冷房設定温度を下げる為2024年度は12℃とした。中温温水の送水温度は、2023年は40℃とした。快適性調査アンケート結果から暖房能力は40℃で十分であることがわかり、引き続き40℃設定にて運用を継続する方針としている。

表-12 冷房の設定温度

階	2023年度		2024年度	
	空調	床	空調	床
4階	23℃	24℃	22℃	20℃
3階	23℃	24℃	22℃	21℃
2階	23℃	24℃	23℃	22℃

表-13 暖房の設定温度

階	2023年度		2024年度	
	空調	床	空調	床
4階	23℃	21℃	22℃	21℃
3階	23℃	22℃	22℃	22℃
2階	23℃	23℃	23℃	23℃

快適性の検証

当初、PMV計測により快適性を評価する予定であったが、2つ問題が生じた。1つ目は、教室を使用しながらPMV計測機器の設置が困難であったこと。2つ目は、学生がいない状態でのPMV測定は、CO₂濃度が低いため、外気風量が絞られ、計測してみたものあまり参考となるような結果が得られなかったことである。

そこで学生に対して、夏季、冬季のアンケート調査を行い、満足度（不満足度）を測り、快適性を評価することとし、性別、着座位置、温冷感覚、湿度感覚、床冷暖房の快適性について詳しく調査する事とした。暖房運転については、開学前の2023年1～3月に試運転調整ができたが、開学して直ぐの2023年の夏の冷房の調査を行ったが、校舎全体に暑いとの調査結果から、試運転調整不足や、維持管理者の理解不足が判明し、チューニングを行った。夏季の調査は、2024年夏季（竣工18か月後）のものである。

アンケート調査の実施

冷房快適性調査は2024年度に行った。調査対象生徒数は950人、有効回答者は662人（有効回答率70%）、2～4階の教室がアンケート対象となっている。有効回答者属性（男性：287人/女性：363人/不明12人）であった。

暖房快適性調査は2023年度に行った。調査対象生徒数は656人、有効回答者は553人（有効回答率84%）となった。アンケート時、3年生は大学試験や卒業間際で不在であり、残念ながら3年生が在籍する2階を除く、3、4階の教室がアンケート対象となっている。有効回答者属性（男性250人/女性288人/不明15人）であった。



図-41 アンケート用紙

温冷感覚と階、座席位置の検証

初年度2023年の夏の冷房運転もアンケート調査を行っている。その調査結果から4階が暑いと回答を受けていたため、2024年度は、空気温度23→22℃、床放射温度24→20℃に設定変更した事により階による温冷感は大きく改善されている。さらにアンケート調査後、空気温度設定を22→22.5℃に見直しを行った。

冷房運転

階による違いは、3階が寒いとの調査結果となった。空気温度と床放射冷房の設定温度のバランスによるものと考えられる。座席位置による違いは、窓側が寒く廊下側が暑く感じられる傾向となった。廊下側吹出による窓面顕熱処理用の外気の影響と考えられる。（図-42）

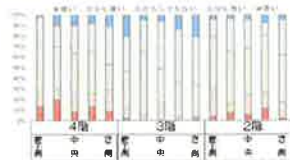


図-42 夏季温冷感覚

暖房運転

階による違いは、4階に比べ3階の方が少し寒く感じる傾向となった。座席位置による違いは、廊下、中央、窓側の座席位置による大きな違いは認められなかった。窓側壁面、ガラスの表面温度の確保および窓の冷ドラフトの発生抑制による効果と考えられる。（図-43）

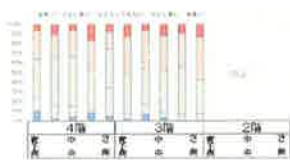


図-43 冬季温冷感覚

湿度感覚と階、座席位置の検証

高湿度差吹出空調はDB12℃まで過冷却除湿が可能である為、乾燥しているというアンケート結果もわからなくはないが、それとほぼ同数の湿度が高いとの回答がある。個人差や環境要因による環境のばらつきと考察される。

冷房運転

階による違いは、温冷感と同様に3階が少し乾燥しているとの意見が多いが、絶対湿度は全館同一の理由は定かでない。座席位置による違いは、顕著な違いは見受けられない。（図-44）

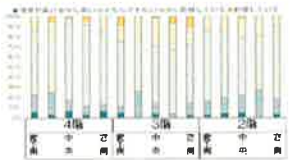


図-44 夏季湿度感覚

暖房運転

冷房時に比べ「どちらでもない」という回答は中央値から外れ、乾燥していると感じる生徒が多い傾向となっている。階および座席位置による顕著な違いは見受けられない。（図-45）

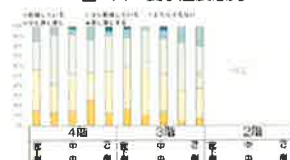


図-45 冬季湿度感覚

床冷暖房の効果検証

床冷房の設定温度は室温-2℃程度の設定としていることから、足元が寒いという回答が多いと心配された。床暖房については、頭寒足熱による眠くならない空調を目指したことから、快適性については、眠くなる頻度について調査を行った。

床冷房運転

床冷房の快適性については、主に上下温度による不快感について調査を行った。調査結果からは足元が寒い訴えはなかった。階および座席位置による顕著な違いは見受けられない。（図-46）

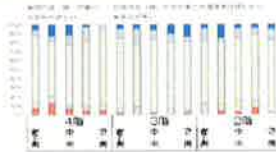


図-46 床冷房快適性

床暖房運転

眠くなる事が多い/時々眠くなる と大部分の生徒が回答した。階および座席位置による顕著な違いは見受けられない。（図-47）少し寒く感じるくらいの室温設定にすると、改善すると思われる。

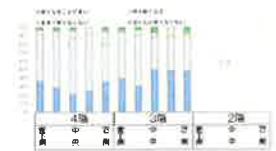


図-47 床暖房快適性

不満足率

アンケート調査結果からPPD（不満足率）を想定する。

「冷房時不満足率=暑い6%+寒い9%=15%」

「暖房時不満足率=寒い4%+暑い10%=14%」

となった。-0.5<PMV<0.5に相当するPPD<10%をめざしたが、目標より不満足率は高くなった。

廊下/窓側の座席配置による大きな違いは見受けられなかったが、相反した暑い/寒いとの回答が寄せられている事から、体格、男女の違いを含め、個人の好みとも考える。（図-48,49）建設費を抑えながら、省エネルギー性と快適性の成果がえられたことを評価したい。これ以上不満足率を下げるには、個人毎の選択が可能なパーソナル空調を取り入れないと改善は難しいと考察される。



図-48 冷暖房不満足率



図-49 床冷暖房不満足率

まとめ

2年間の運転実績検証により、ZEB Ready実現のために導入した各種技術、教室毎のCO₂濃度による外気量VAV制御の導入や床冷暖房放射空調や6面表面温度を整える有効性がわかった。寒冷地であっても、空冷ヒートポンプチラーは、中温冷水水を採用することで、暖房時の高効率運転が可能であることがわかった。学校用途であっても、事務用途と同じかそれ以上の時間使われる可能性があること、当該学校施設では利用時間がWEBプログラムより長くても、同程度の一次エネルギー消費量を示した。利用時間が短い施設と考えがちな学校用途も、積極的に省エネルギー性能を向上することが重要であるがわかった。

快適な教室で「眠くならない頭よくなる教室」の実現は難しい

人は快適だと眠くなる事が今回の調査結果からわかった。「快適な環境→脳にストレスが無い→リラックス=眠くなる」と考察される。残念ながら当初めざした快適かつ眠くならない教室の実現は至らなかったが、眠くなるということは、満足度が高い空調が実現できたと思えるべきなのかもしれない。授業中の設定温度を低くするなどのゆらぎ空調が有効であるかもしれないことを認識した。

受賞歴、雑誌掲載、論文など

- 学会発表
 2023 日本建築学会 寒冷地の学校におけるZEB Ready を実現する設備計画
 2023 空気調和・衛生工学会 寒冷地の学校におけるZEB Ready を実現する計画
 2023 日本建築学会 建築デザイン発表会 北海道科学大学高等学校
 2023 JSCA構造デザイン発表会 これまでにない立体的な空間を生み出す構造計画
 2025 日本建築学会 寒冷地の学校におけるZEB Ready を実現する設備計画
 (その2) 快適性の検証
 2025 空気調和・衛生工学会 寒冷地の学校におけるZEB Ready を実現する計画
 (第2報) 運転実績の報告と検証

- 受賞歴
 2016.04 北海道優秀照明施設賞
 2023.09 SDA 賞 第57回日本サインデザイン賞 入選
 2023.09 SDA 賞 第57回日本サインデザイン賞 地区デザイン賞
 2023.10 日本空間デザイン賞 Longlist(入選)

- メディア掲載
 2023.07 近代建築
 2024.07 concept view 建設工業新聞
 2024.07 Arch daily
 2023 日経建「サステイナブル建築事例集」
 2023 日本コンクリート工学会北海道支部 支部設立30周年記念誌