

環境技術実証棟における外装熱性能検証

VERIFICATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF EXTERIOR PACKAGES
IN THE EXPERIMENTAL BUILDING浅野 涼太*¹, 村江 行忠*², 竹中 優揮*³, 栗木 茂*³, 伊藤 優*¹
Ryota ASANO, Yukitada MURAE, Yuki TAKENAKA, Shigeru KURIKI and Yu ITO

Various environmental technologies were verified from 2017 to 2020 in the Experimental Building during the rebuilding of the head office. In this report, we report on the interior thermal environments with various office exteriors and exterior thermal performance that were verified during the operation period. The details of this verification and measurement results were shared with the design department, and the exterior specifications of the TODA BUILDING were considered based on these verification data.

Keywords: *Experimental building, Highly insulated exterior, Double skin, Thin double skin, Heat transmission coefficient, Solar heat gain rate*

実証建物, 高断熱外装, ダブルスキン, 薄型ダブルスキン, 熱貫流率, 日射熱取得率

1. はじめに

当社筑波技術研究所内の環境技術実証棟（以下、実証棟）では、2017年4月から2020年10月まで運用し、各種環境配慮技術の実証¹⁾を行った。TODA BUILDING 建て替えにあたり、近年、省エネやCO₂排出量削減、RE100が大きく謳われる中、建物の環境負荷における外壁の占める割合が大きいことから、TODA BUILDING ではデザイン性や経済性に加えて、環境性能の優れた外装を採用することが必須となる。また、外装性能は過去の実建物におけるデータにて測定条件の違いによるばらつきが生じることがある。よって、実証棟にて同条件下で比較測定することで実践的な検証を行い、今後のオフィス設計における有効なエビデンスデータを取得することを筆者らの目的とした。本報は、既報²⁾にて報告した内容に加筆し、外装毎の事務室内温熱環境及び外装熱性能を検証した結果を報告する。

2. 実測概要

2.1 外装

外装はTODA BUILDINGで熱負荷の大きい南面のスパン割り、階高、方位を合わせており、近年の採用事例を踏まえ、3種類の外装を想定した。南側外装概要を図1、外装仕様を表1に示す。各外装の概要を以下に記す。
ダブルスキン（以下、DS）：環境配慮型中高層建物で採用の多い、キャビティ奥行き690mmで2層吹抜ダブルスキン。上部に開放可能な自然換気窓を設け、夏期は開放して排熱し、冬期は閉鎖して温室効果による熱負荷低減を狙った。

薄型ダブルスキン（以下、CDS）：都市部高層建物で採用が見られ、奥行き385mmの省スペース性に優れた2層吹抜

ダブルスキン。上部には常時解放されている換気スリットを設けており、DSと同様、キャビティ内換気による熱負荷軽減を狙った。幅1200mmダブルスキンと自然換気機構を組み込んだ幅600mmのパネル部で構成されており、自然換気やキャビティ内自動制御ブラインドの各種実証を行った。

バルコニー+縦ルーバー（以下、BL）：出寸法1.5mの庇と幅340mmの縦ルーバーを8本設け、外部での日射遮蔽効果を期待した。

2.2 測定条件

測定機器設置図を図2、3に示す。1階と2階にオ

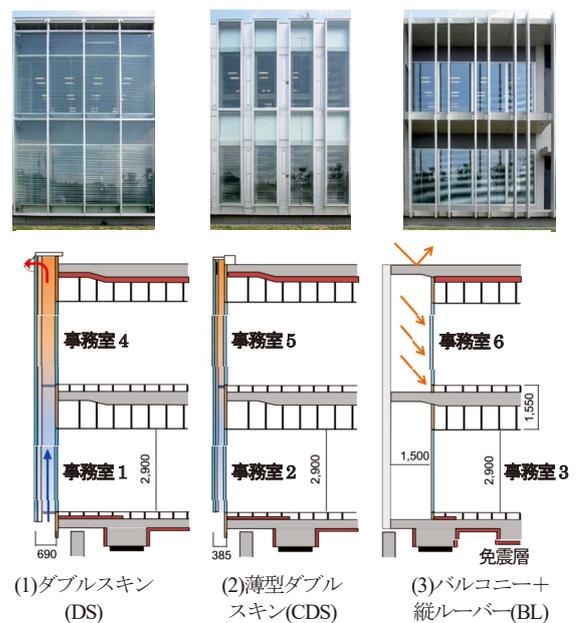


図1 南側外装（上. 写真 下. 概要図）

*1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

*2 戸田建設(株)技術研究所 工学修士

*3 戸田建設(株)技術研究所

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION

表1 外装仕様

ダブルスキン (DS)	
ガラス	吹抜け2層 奥行き: 690mm アウター: 透明単板8mm インナー: 日射遮蔽型 Low-E 複層8mm+空気層12mm 換気窓面積: 0.58m ² ×4グリッド 換気: 夏期, 中間期: 開放 (8:30~17:30) 冬期: 通常閉鎖
薄型ダブルスキン (CDS)	
ガラス	吹抜け2層 奥行き: 385mm アウター: 透明単板6mm インナー: 日射遮蔽型 Low-E 複層6mm+空気層6mm 換気スリット面積: (0.01m ² ×2面) ×4グリッド 換気: 常時換気 パネル部: アルミ板2.0mm+吹付ロックウール30mm
バルコニー+縦ルーバー (BL)	
庇	出寸法: 1.5m
ガラス	日射遮蔽型 Low-E 複層6mm+空気層6mm

表2 測定項目

測定項目	測定箇所	高さ [mm]	測定機器
空気温度	ペリメータ (測定点①) インテリア (測定点②~⑤)	FL+100	T型熱電対
		FL+600	
		FL+1100	
		FL+1700	
		FL+2200	
	キャビティ内	FL+100 FL+1100 FL+1900 FL+2800 FL+3700	
表面温度	アウターガラス ブラインド インナーガラス	FL+1450	T型熱電対
表面熱流	壁面アウターガラス インナーガラス	FL+1450	熱流計 Z2016 (HIOKI)
	床面 天井面	FL+0 CL-0	
グローブ温度	ペリメータ インテリア	FL+1100	T型熱電対
鉛直日射量	インナーガラス室内側 (DS CDS) ブラインド室内側(BL)	FL+1450	日射計 MS-602 (英弘精機)
外気温度	屋上		T型熱電対
南面鉛直日射量		日射計 MS-602 (英弘精機)	

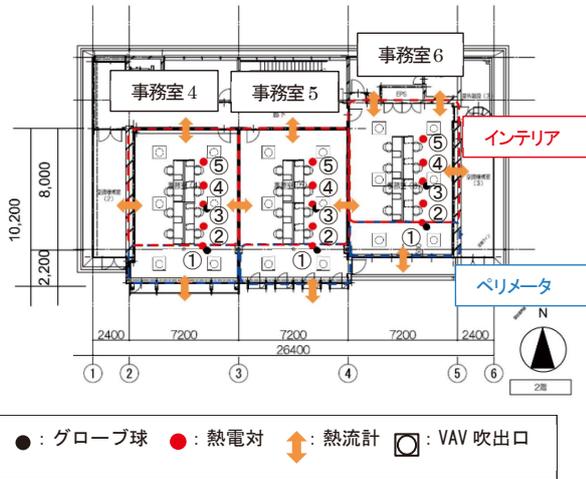


図2 測定点平面図 (2階)

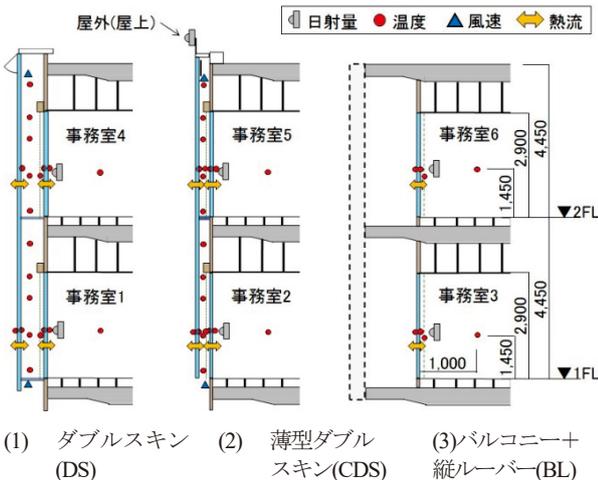


図3 外装周り測定点断面図

フィス運用を想定した7.2m×10.2m×H2.9mの室(以下, 事務室)があり, 外装から2.2mをペリメータ, 以降をインテリアに分け, 吹出口の設置位置を決定した. 事務

室中央付近に人体発熱を模擬した電気毛布(55W×8人)を設置し, 8:00~18:00(以下, 在室時間帯)に発熱した. 空調設定室温は夏期26℃, 冬期22℃とし, 在室時間帯に空調した.

DS上部の換気窓について夏期は8:30~17:30に開放し, 冬期は開放しなかった. また, CD, CDSのブラインドはキャビティ内, BLは室内側に取り付けており, ブラインド角度を45°固定にした.

表2に測定項目を示す. 室内の上下空気温度, グローブ温度^{註1}, 熱流, 南面鉛直日射量はワイヤレスデータロガ(HIOKI LR8416)を用いて1分間隔で連続的に記録した.

3. 外装3種の事務室温熱環境比較 (2017年度)

3.1 夏期温熱環境測定

夏期は日中最高気温が高く, 日射量の多い日である2017/7/21の温熱環境を評価した. 図4にペリメータ(測定点① FL+1100mm)とインテリア(測定点③ FL+1100mm)のグローブ温度変動・南面鉛直日射量, 図5にペリメータの空気温度変動, 図6にガラス表面温度変動を示す. 空調時において, 各事務室のペリメータのグローブ温度はインテリアに比べて約0.5℃ほど高くなった. ペリメータについて空気温度は各室ともに設定温度26℃であり, ガラス表面温度は29℃~32℃であったことから, 窓面の放射が影響したと言える.

ダブルスキン外装と比較すると, ガラス表面温度は事務室5で最高32℃に達していたものの, 同一階の事務室

4とグローブ温度で大きな差が見られなかった。要因として、ガラス面積が2/3のため、窓面日射熱取得の影響が相対的に低かったことがあげられる。

CDSを全面採用とする場合、他事務室よりもガラス表面温度が高くなったことから、夏期ペリメータにおける温熱環境に与える影響が実証棟事務室よりも大きくなることに留意する必要がある。以上より、CDSキャビティ

内排熱を促進するための通気性能の改善や、インナーガラス熱性能の向上が課題となった。

3.2 冬期温熱環境測定

冬期について、図7にペリメータ（測定点①FL+1100mm）とインテリア（測定点③FL+1100mm）のグローブ温度変動・南面鉛直日射量、図8にペリメータの空気温度変動、図9にガラス表面温度変動を示す。日中最高

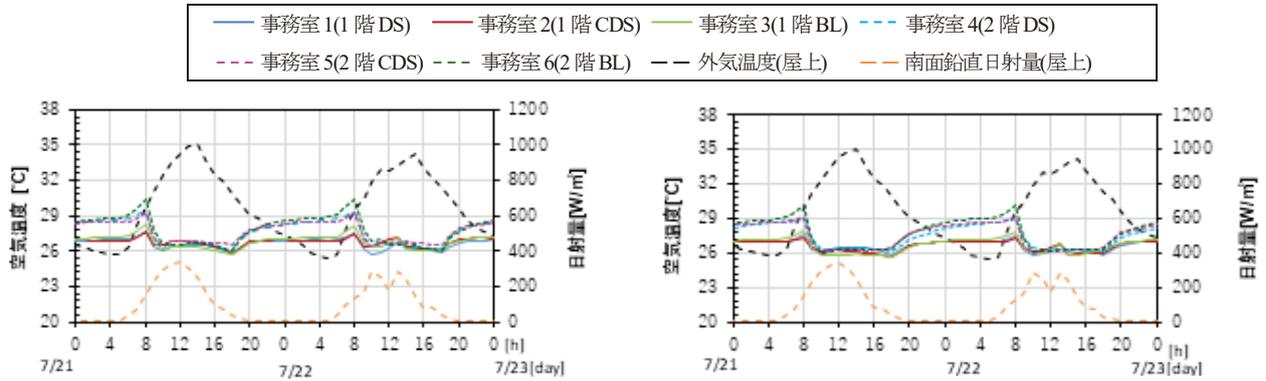


図4 夏期グローブ温度 (2017/7/21 ~ 7/22 : 左:ペリメータ 右:インテリア)

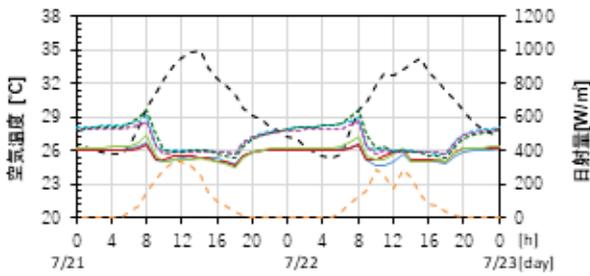


図5 夏期ペリメータ空気温度 (2017/7/21 ~ 7/22)

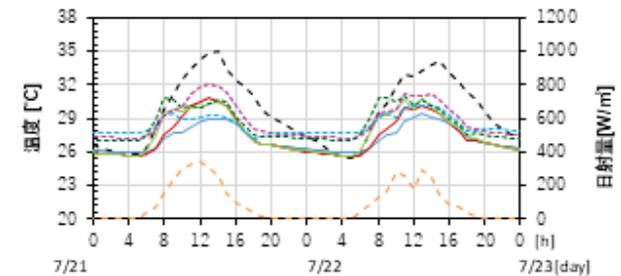


図6 夏期室内側窓ガラス表面温度 (2017/7/21 ~ 7/22)

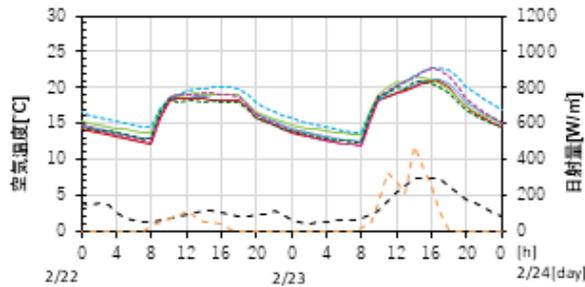


図7 冬期グローブ温度 (2018/2/22 ~ 2/23 : 左:ペリメータ 右:インテリア)

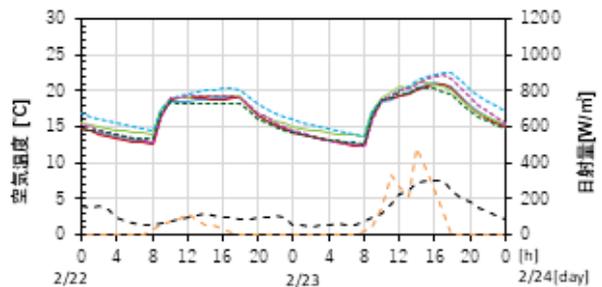


図8 冬期ペリメータ空気温度 (2018/2/22 ~ 2/23)

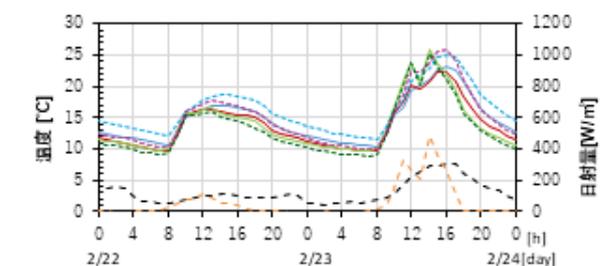


図9 冬期室内側窓ガラス表面温度 (2018/2/22 ~ 2/23)

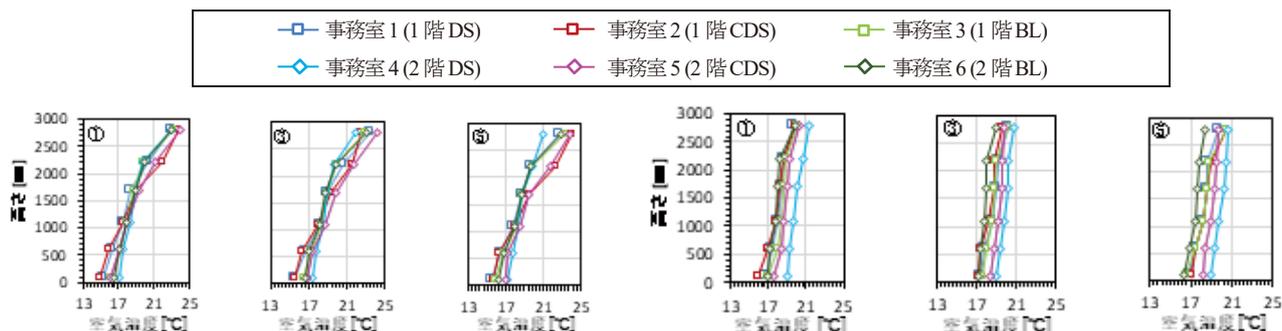


図10 冬期室内上下温度分布 (2018/2/22 左: 10:00 右: 14:00)

気温、日射量が少ない2018/2/22と日射量の多い2018/2/23を比較すると、2/22の在室時間帯の各事務室のグローブ温度はインテリアがペリメータに比べて約0.3℃で高くなり、2/23ではペリメータがインテリアに比べて約0.3℃高くなった。2/22は事務室4のペリメータ空気温度が約20℃に対し、ガラス表面温度が約18.5℃、2/23は事務室4で空気温度が約22℃に対し、ガラス表面温度が約23.0℃であることから窓面の日射が影響すると言える。事務室3、6グローブ温度について、2/23のガラス表面温度が12:00で23.6℃、14:00で25.4℃と日射量に対応して温度変化していたが、夏期と同様に、室内側ブラインドによりガラス面の影響をあまり受けていなかったと考えられる。2/22の18:00以降のグローブ温度降下を見ると、事務室5は翌日6:00には事務室3、6と同等まで下がった。DSと同様、CDSキャビティ上部に暖気が滞留するため、ガラス表面温度は事務室3、6よりも高くなるものの、CDSパネル面から熱が逃げたためと考えられる。

図10に測定点①③⑤について、空調2時間後(10:00)、空調6時間後(14:00)の上下温度分布を示す。ペリメータ(測定点①)とインテリア(測定点③⑤)の温度差を見ると、FL+100mmとFL+2800mmを除き、各事務室は±0.7℃以内で空調できていた。足下温度差についてFL+100mmとFL+1100mmの上下温度差の時間経過を見ると、事務室4ペリメータで空調2時間後の上下温度差が1.2℃であったのが、空調6時間後では0.8℃、事務室5で2.0℃から1.2℃、事務室6で1.6℃から1.0℃とDS<BL<CDSの順に大きくなった。CDS事務室は外装の1/3がパネルであり、パネル放射で冷やされた空気が下降したためと考えられる。

事務室3、6の夏期と冬期実測結果から、BL外装の狙いである、外部日射遮蔽効果を確認することができたので、高断熱窓ガラスとあわせて採用すれば、室内温熱環境の向上が期待できる。

4. CDS仕様変更後の外装測定(2018年度)

CDSダブルスキン部はキャビティ容積が小さいため、排熱が十分行われないとペリメータ温熱環境が悪化するという問題を受け、2018年度の外装測定ではCDSの性

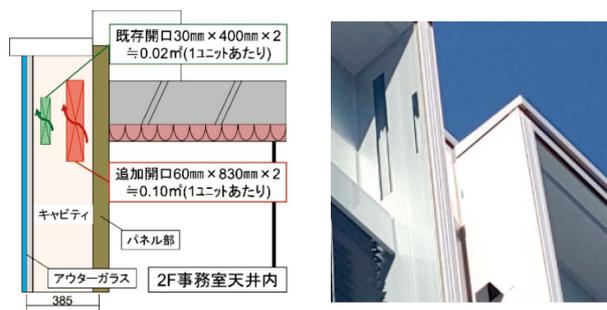


図11 CDS仕様変更概要(左:概要 右:写真)

表3 CDS変更仕様

	スリット開口面積	インナーガラス	測定期間
Case1	0.02m ²	FL6+A6+FL6	2017.04~2018.07
Case2	0.12m ²	FL6+A12+FL6	2018.08~
Case3		FL6+A12+FL6	

能向上のため、キャビティ内通気量を増やすため、仕様変更を実施した。

4.1 仕様変更概要

CDS外装を図11、仕様を表3に示す。仕様変更として、換気スリットを0.10m²追加し1ユニットあたりの開口面積を0.02m²から0.12m²に増やした。また、インナーガラスは1ユニットのみ複層ガラス(FL6+A6+FL6)から複層ガラス(FL6+A12+FL6)に変更した。仕様変更後の実測は2018年8月11日から開始した。仕様変更前(開口面積0.02m²、複層ガラス(FL6+A6+FL6))をCase1、換気スリット追加後(開口面積0.12m²複層ガラス(FL6+A6+FL6))をCase2、インナーガラス変更後(開口面積0.12m²複層ガラス(FL6+A12+FL6))をCase3とする。測定箇所は図12の通り、仕様変更後CDS、2か所を対象としている。また、表4に測定項目を示す。室内の上下空気温度、キャビティ内温度、熱流、南面鉛直日射量はワイヤレスデータロガー(HIOKI LR8416)を用いて1分間隔で連続的に記録した。

4.2 CDSキャビティ内温度分布測定

仕様変更前後のペリメータ側の熱流入削減効果を評価するため、キャビティ内温度分布測定結果を示す。夏期

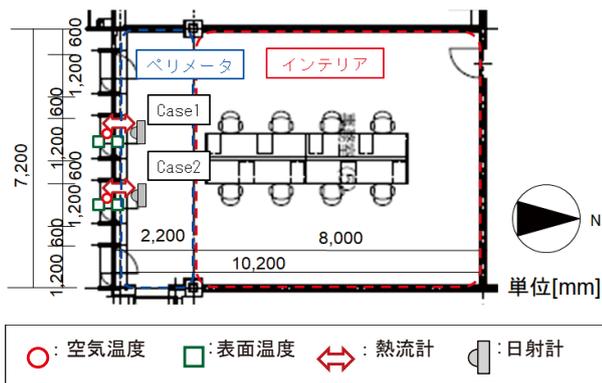


図12 測定機器設置平面図 (CDS 事務室)

表4 CDS仕様変更後測定項目

測定項目	測定箇所	設置高さ (mm) フロア当たり	測定項目
空気温度	ペリメータ	FL+100 FL+600 FL+1,100	T型熱電対
	インテリア	FL+1,700 FL+2,200 FL+2,800	
	キャビティ内	仕様変更前 FL+100 FL+1,100 FL+1,900 FL+2,800 FL+3,700 仕様変更後 FL+100 FL+1,450 FL+2,900	
表面温度	インナーガラス ブラインド アウターガラス	FL+1,450	T型熱電対
熱流	インナーガラス アウターガラス	FL+1,450	熱流計 Z2016 (HIOKI)
鉛直日射量	室内南面	FL+1,450	日射計 MS-602 (英弘精機)
外気温度	屋上		T型熱電対
鉛直日射量			日射計 MS-602 (英弘精機)

は日射量の多い日を代表日とし、外気温、日射量が2018年度と2017年度で同等の測定日を評価し、冬期は日射量の少ない日を代表日とし、外気温、日射量が2018年度と2017年度で同等の測定日を評価した。

(1) 夏期

図13に夏期のキャビティ内温度変動・南面鉛直日射量を示す。最高温度を比較すると、Case1で66.1℃、Case2で45.3℃、Case3で41.9℃と換気スリット追加後は追加前よりも17.6℃、11.5℃低くなった。また、1FL+100mmと2FL+2,900mmの空気温度差を比較すると、Case1では28.2℃、Case2では18.2℃、Case3では14.4℃とキャビティ内の上下温度差が小さくなった。図14に日中最高温度時のキャビティ内温度分布を示す。インナーガラス室内側

表面温度は、暖気上昇により2階のほうが高くなった。2階のインナーガラス室内側表面温度を比較すると、Case1は34.6℃、Case2は31.8℃、Case3は30.5℃となり、開口追加により2.8℃下がり、インナーガラス変更でさらにキャビティ内空気温度が1.3℃下がった。以上から、CDS仕様変更により、ペリメータの温熱環境が改善されることが示唆された。

(2) 冬期

図15に冬期のキャビティ内温度変動・南面鉛直日射量を示す。最高温度を比較すると、Case1で17.3℃、Case2で9.0℃、Case3で5.8℃となり、換気スリット追加によりキャビティ内温度が低下した。図16に空調立上り時(8:00)のキャビティ内温度分布を示す。各ケースの1階インナーガラス室内側表面温度を比較すると、Case1は9.7℃、Case2は8.7℃、Case3は9.1℃となったことから、換気スリット追加により熱流出の増加することを考慮する必要がある。

5. BL 事務室窓ガラス仕様変更

CDS仕様変更と同時期に、高断熱性能ガラスとして実用化段階であったトリプルガラスをTODA BUILDING外装としての採用を検討しており、事務室6の窓ガラスを図17の通りに変更した。BL事務室の窓ガラスの仕様は表5に示す通り、仕様を変更していない事務室3をガラスA、事務室6の窓ガラスをそれぞれB、C、D、Eとして熱性能を検証した。

6. 各外装熱性能比較 (2018年度)

6.1 U値η値算出

2018年9月の実測値から外装熱性能を評価した。キャビティ内の熱収支概念を図18に示す。熱貫流率(以下U値)と日射熱取得率(以下η値)の表6に示す算出式を用いて計算した。

6.2 各外装熱性能

各外装熱性能値を図19と表7に示す。仕様変更前後のCDSについて、DSのU値が1.4に対し、CDSの仕様変更前のCase1で1.8だったが、インナーガラスを変更し、換気スリットを追加したCase3で1.2と同程度まで向上した。また、η値についてDSが0.26に対し、Case1で0.29だったが、換気スリットを追加したことによりCase3のη値が0.11とDSよりも向上した。

BLの各種ガラス面について、U値は表に示すカタログ値と同等の性能であり、ガラスAでU値が1.9に対し、仕様変更後のガラスB～Eで1.0前後であった。また、η値はガラスAで0.24に対し、ガラスB～Eで0.2未満となった。BLの夏期η値がカタログ値や、DSの0.26よりも低かったのは、底による影響と評価できる。ガラスBのη値が0.14とC～Eに比べ小さくなったのは、他ガラスとの性能値の差と、隣室(事務室5)外壁の日射遮蔽によるものと推測される。

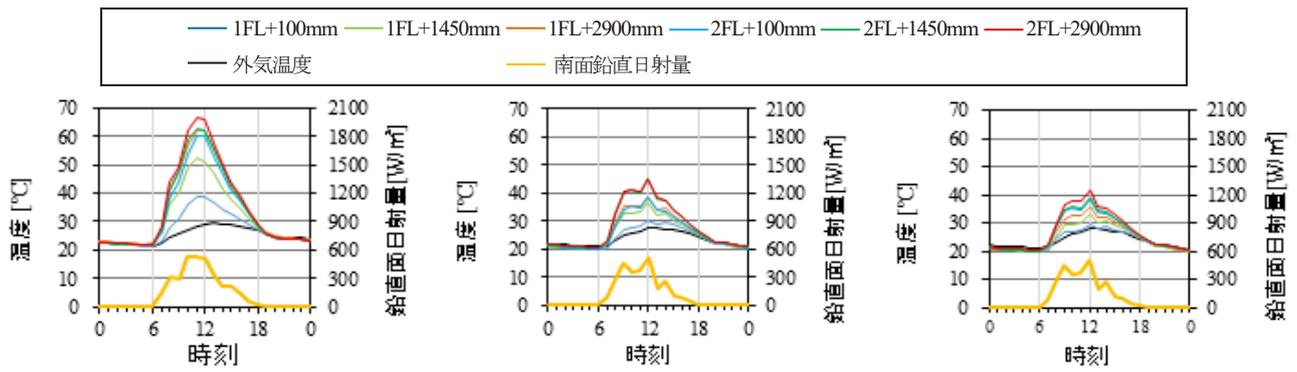


図13 夏期キャビティ内上下温度変動

(左 Case1: 2017年9月13日 中央 Case2: 2018年9月18日 右 Case3: 2018年9月18日)

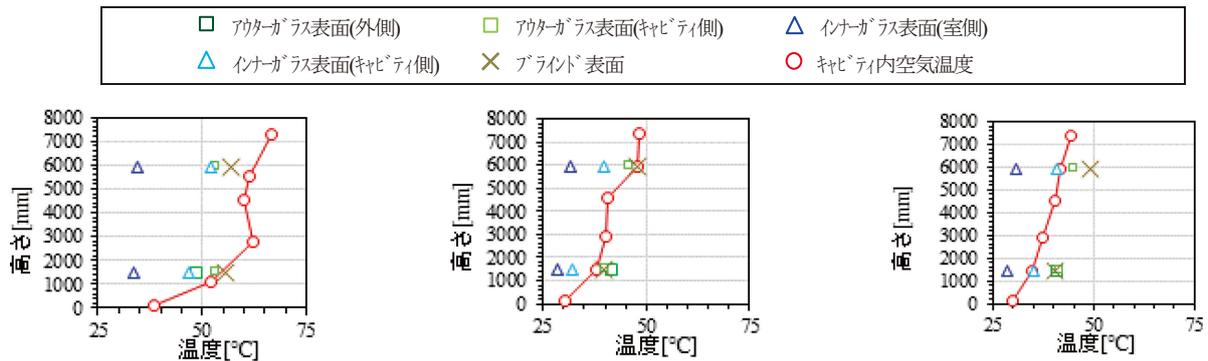


図14 夏期キャビティ内上下温度分布

(左 Case1: 2017年9月13日 外気28.2°C 中央 Case2: 2018年9月18日 外気28.1°C 右 Case3: 2018年9月18日 外気28.1°C)

注2

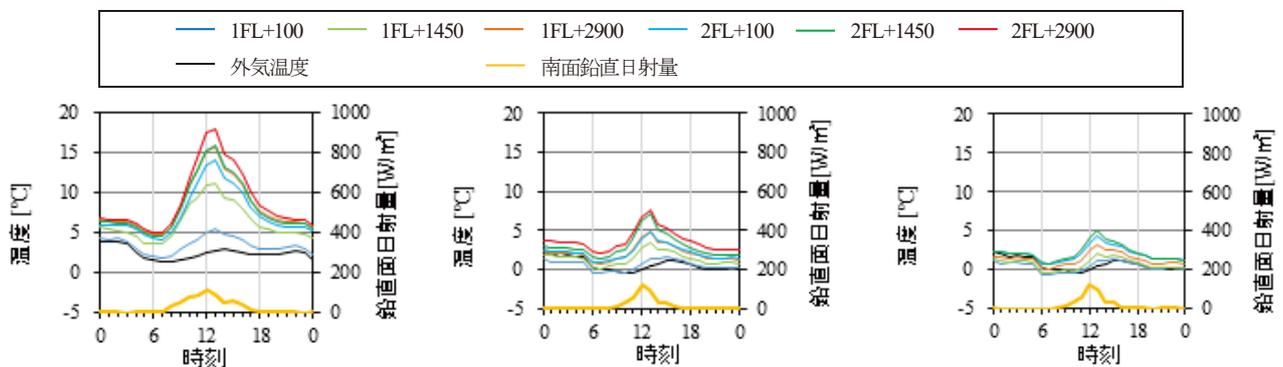


図15 冬期キャビティ内上下温度変動

(左 Case1: 2018年2月22日 中央 Case2: 2019年2月9日 右 Case3: 2019年2月9日)^{注3}

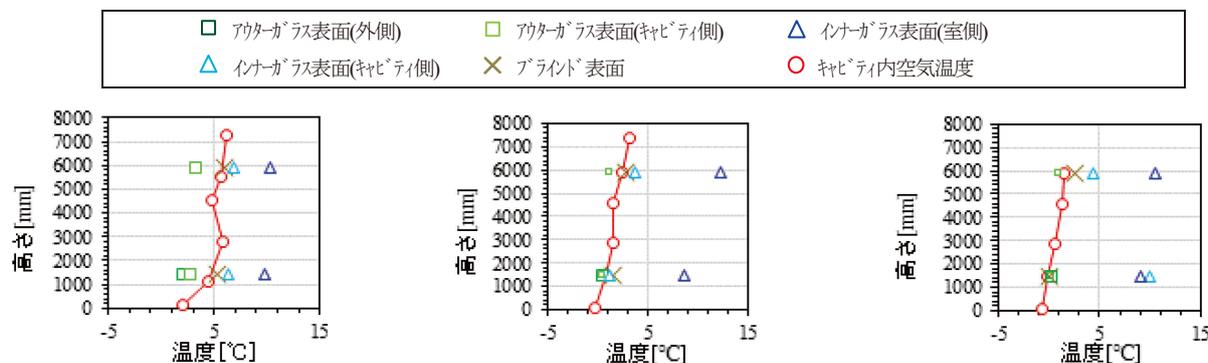


図16 冬期キャビティ内上下温度分布

(左 Case1: 2018年2月22日 外気1.2°C 中央 Case2: 2019年2月9日 外気-0.2°C 右 Case3: 2019年2月9日 外気-0.2°C)

注2, 3

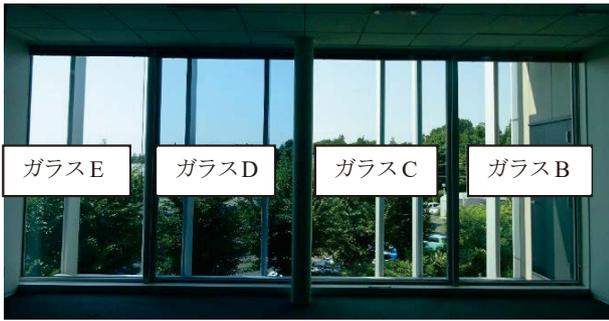


図 17 事務室 6 (2階 BL 事務室) 窓ガラス

表 5 BL 事務室窓ガラス仕様

ガラス	仕様
ガラス A (1階)	日射遮蔽型 Low-E 複層6mm+空気層6mm
ガラス B (2階)	Low-E 銀 3層8mm+アルゴン12mm+Low-E 銀 1層8mm+アルゴン12mm+倍強度ガラス12mm
ガラス C (2階)	Low-E 銀 3層8mm+空気層16mm+Low-E 銀 1層8mm+空気層16mm+倍強度ガラス12mm
ガラス D (2階)	Low-E 銀 2層8mm+空気層16mm+Low-E 銀 2層8mm+空気層16mm+倍強度ガラス12mm
ガラス E (2階)	Low-E 銀 2層8mm+空気層16mm+Low-E 銀 1層8mm+空気層16mm+倍強度ガラス12mm

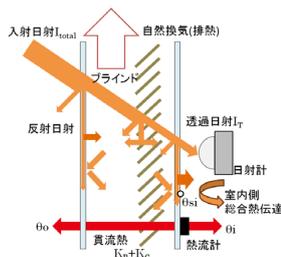


図 18 キャビティ内熱収支概念図

I_{total} : 入射日射量 [W/m^2]	I_T : 透過日射量 [W/m^2]
θ_i : 室内空気温度 [$^{\circ}C$]	θ_o : 室外空気温度 [$^{\circ}C$]
θ_{si} : インナーガラス表面温度 [$^{\circ}C$]	
K_R : 室内と外気の温度差によりインナーガラスから流入する貫流熱の放射成分 [W/m^2]	
K_C : 室内と外気の温度差によりインナーガラスから流入する貫流熱の対流成分 [W/m^2]	
α_i : 室内側表面総合熱伝達率 ($8W/m^2K$ とする)	

表 6 熱性能値計算方法 3)

U 値 ^{注4}	$U = (K_R + K_C) / (\theta_o - \theta_i)$
η 値 ^{注5}	$\eta = \{I_T + \alpha_i(\theta_{si} - \theta_i) - (K_R + K_C)\} / I_{total}$

7. まとめ

本検証内容及び測定結果は設計部門と共有しており、TODA BUILDING の外装仕様はこれらの検証データをもとに検討された。

最後に、環境技術実証棟運用期間中の各種外装測定から得られた知見を以下にまとめる。

- ・夏期冬期の事務室内温熱環境について、DS 事務室と CDS 事務室を比較すると、CDS 事務室で室内側窓ガラス表面温度が他事務室より高くなったが、窓面積が他室の2/3であることから日射取得時のペリメータへの

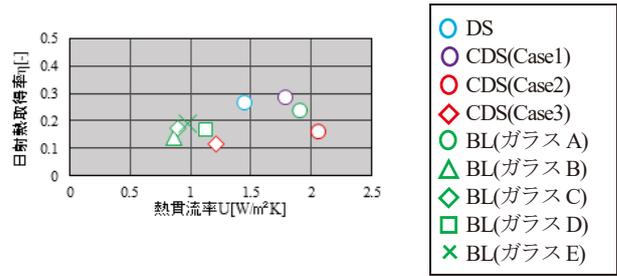


図 19 U 値 η 値散布図

表 7 U 値 η 値 1 ヶ月平均値 () はカタログ値

	U 値 [W/m^2K]	η 値 [-]	
DS ^{注6}	1.4	0.26	
CDS ^{注6}	Case1 ^{注7}	1.8	0.29
	Case2	2.1	0.16
	Case3	1.2	0.11
BL	ガラス A	1.9 (2.5)	0.24 (0.56)
	ガラス B	0.9 (0.7)	0.14 (0.20)
	ガラス C	0.9 (0.8)	0.17 (0.21)
	ガラス D	1.1 (0.8)	0.17 (0.21)
	ガラス E	1.0 (0.8)	0.19 (0.26)

影響は低く、両者で大きな差が見られなかった。

- ・一方、冬期において、CDS 事務室は前述に加えて、パネル部からの冷却の影響を受けているため室温低下が他事務室よりも大きくなった。BL 事務室は底部と室内ブラインドにより、他 2 室と比較すると日射熱取得の影響を受けにくかった。
- ・冬期のペリメータの足下温度差を見ると、 $DS < BL < CDS$ となり、前述の通り、CDS 事務室ガラス面が他室より少ないことや、外装パネル部の冷却による影響が表れていたと評価できる。
- ・CDS 仕様変更後の換気スリット追加により η 値を低減することができた。また、インナーガラスの熱性能を変更することで η 値に加えて、DS と同等以下まで U 値を低減することができた。
- ・BL 事務室の U 値は Low-E 複層6mm もので 1.9 に対し、仕様変更後のガラスで 1.0 前後であった。また、 η 値は底の影響が大きく、ガラス面による違いが現れなかった。

注釈

- 注 1 直径40mm のピンポン球を黒く塗装したものを用いて測定したものをグローブ温度として扱った。別測定にてペルソン式黒球のグローブ温度と乖離が少ないことを確認した。
- 注 2 アウターガラス屋外側表面温度は 1 階のみ測定した。
- 注 3 Case3 の 2FL+2900mm のデータは欠測したため表記していない。
- 注 4 U 値は夜間 (0:00~4:00) の平均値とし、室内と外気の温度差によりインナーガラスから流入する貫流熱の放射成分との対流成分の和 ($K_R + K_C$) はインナーガラスに貼り付けた熱流計の測定値を用いた。

- 注5 η 値は日照時間（8：00～16：00）の平均値とし、 I_r は室内に設置した日射計、 I_{total} は屋上に設置した日射計の測定値を使用した。
- 注6 DS, CDSのU値、 η 値は1階事務室の値を用いた。
- 注7 CDS（Case1）は2017年9月の測定データを使用した。

参考文献

- 1) 伊藤他：オフィス環境を対象とした環境創造技術に関する実証研究（その1）環境技術実証建物の概要と外装3種類の熱性能および自然換気に関する実証，戸田建設技術研究報告第43号，2017.11.
- 2) 浅野他：オフィス環境を対象とした環境創造技術に関する実証研究（その2）外装3種類の熱性能比較，温熱環境及び空調処理熱量の評価，戸田建設技術研究報告第44号，2018.11.
- 3) 加藤他：ダブルスキンの熱的性能予測に関する研究（その1），空気調和衛生工学会大会梗概集，pp373-376，2007.9