

集合住宅におけるダイナミックインシュレーション窓による断熱改修に関する研究 —群馬県前橋市内の公営住宅を対象とした現場実測による性能評価(その2)—

Study on Insulation Retrofit by Dynamic Insulation Window in A Multi-Family House

—Performance Evaluation by Field Measurement in Public Housing in Maebashi City, Gunma Pref. Part.2—

木村 秀斗*, 三田村 輝章**, 大浦 豊***, 藤園 武史***, 岡村 大輔***

Shuto Kimura, Teruaki Mitamura, Yutaka Oura, Takeshi Fujizono and Daisuke Okamura

keywords: Dynamic Insulation, SHGC, Multi-Family House, Field Measurement
ダイナミックインシュレーション, 日射熱取得率, 集合住宅, 実測調査

1. はじめに

本研究では、高度経済成長期に建設された公営住宅の断熱改修を目的としてダイナミックインシュレーション窓システムの適用について検討してきた¹⁾⁴⁾。前報³⁾では、ダイナミックインシュレーション窓(以下、DI窓)を適用した群馬県前橋市内の公社賃貸住宅の一住戸における実測結果から、室内外の環境温度差と透過熱量の関係、DI窓中間層中央部の空気温度変動、内障子側と外障子側の中間層温度の関係について分析した結果などを報告した。本報では、引き続き、年間を通じた実測結果からDI窓の動的な熱貫流率(U_{dyn} 値)や動的な日射熱取得率(η_{dyn} 値)を算出し、分析を行った結果について報告する。

2. 調査概要

2.1 対象住戸

図1に対象住戸の平面図を示す。対象住戸は、群馬県前橋市に建設された築50年の公社賃貸住宅の一住戸である。RC造の地上3階建ての2階中間戸であり、DI窓改修前の U_A 値は1.29 $W/(m^2 \cdot K)$ 、気密性能は1.83 cm^3/m^2 (2024年7月2日測定)である。既存窓はアルミサッシ+単板ガラスであり、冷暖房設備は和室6畳にエアコンが1台設置されている。換気設備は浴室と台所に排気ファンが設置されている。浴室・トイレ以外の間仕切り扉は取り外されており、和室4.5畳・南以外の居室は一体化された空間となっている。既存の窓のうち、居室の4箇所をDI窓に改修した(DI1~DI4)。DI2およびDI3はテラス窓であり、DI1およびDI4は腰窓である。居住者は20代の男性一人である。

2.2 DI窓の概要

写真1に対象住戸に設置したDI窓の外観を、図2にDI窓の概要を示す。DI窓は既存の外窓と新たに施工した内窓による二重窓、その間に設置した整流板で構成される。冬期は外窓の換気小窓から外気を導入し、二重窓の内部に流通させ、外窓表面の温度勾配を小さくすることで熱損失を抑制する。一方、内窓では、導入外気は室内から損失する熱を回収して、内窓上部に設置された換気口から室内へ取り込まれる。外窓の換気小窓の開放幅は約5cmとし、換気設備は年間を通して浴室と台所の排気ファンを24時間運転させ、各DI窓から室内に外気を導入し、排気ファンから排気を行う第3種換気として運用する。なお、夏期と中間期においても冬期の運用と同様である。

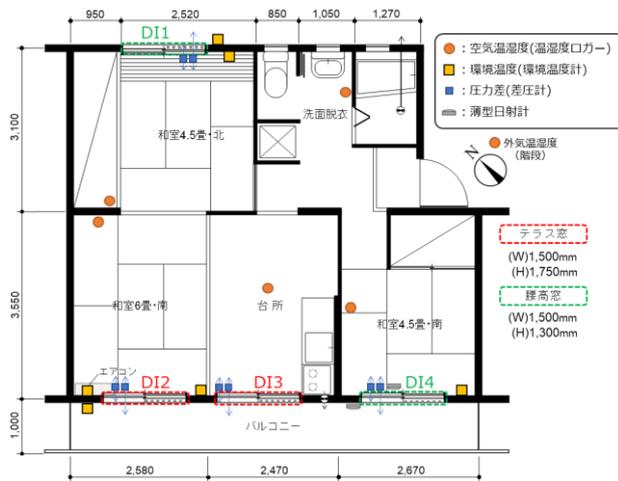


図1: 対象住戸の平面図



写真1: DI窓の外観および日射量計測の様子

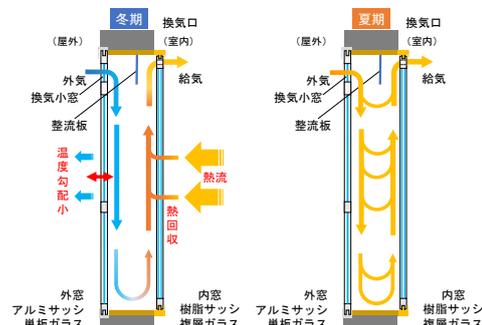


図2: DI窓の概要

* 前橋工科大学大学院・工学研究科 博士前期課程
Graduate Student, Graduate School of Eng., Maebashi Institute of Technology

** 前橋工科大学・工学部 准教授・博士(工学)

Assoc. Professor, Faculty of Engineering, Maebashi Institute of Technology, Dr. Eng.

*** 三協立山株式会社 三協アルミ社

Sankyo Tateyama Inc, SankyoAlumi-Company

2.3 測定方法および性能評価の方法

主な測定項目は各室における環境温度、各DI窓における窓面熱流束であり、2022年1月12日～2023年10月6日の間、計測を行った。図3にDI窓における測定点を示す。また、 η_{dyn} 値を算出するため、DI4内障子側を対象として2022年7月7日～2023年9月24日の間、外壁面および室内側内窓近傍でそれぞれ上下3か所に薄型日射計(英弘精機製、ML-02)を設置し、鉛直面日射量の計測を行った。写真1に日射量計測の様子を併せて示す。

図4にDI窓の動的な熱貫流率 U_{dyn} 値の算出方法を示す。 U_{dyn} 値は外窓の熱流束を室内外の環境温度差で除して算出し、直達日射の影響を考慮し、夜8時から翌5時までの夜間の時間帯について評価する。

図5にDI窓の動的な日射熱取得率 η_{dyn} 値の算出方法を示す。 η_{dyn} 値は、内窓面の鉛直面日射量(Q_{TIN})と内窓面の熱流束(Q_W)、換気による取得熱($Q_{airflow}$)を合わせ、室内外の温度差によって生じる貫流熱の影響を引いて算出した日射による熱取得量の合計を外壁面の鉛直面日射量(Q_{solar})で除して算出する。また、 $Q_{airflow}$ は、外気温と図3上の④の位置における空気温度の差を基準に算出する。

3. 調査結果

3.1 各DI窓における日平均 U_{dyn} 値

図6に各DIにおける日平均 U_{dyn} 値の変動を示す。なお、 U_{dyn} 値は内障子側と外障子側の実測結果を平均化したものであり、DI3における値はDI3内障子側とDI2外障子側の平均値である。非通気時の熱貫流率 U_w 値と比較すると、概ね全期間を通して断熱性能が向上していることから、ダイナミックインシュレーションの効果が十分に発揮されていることが確認できる。2023年1月～3月を2022年1月～3月と比較すると、DI4を除き、断熱性能が概ね $0.2 \sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 改善されていることや、2022年よりも断熱性能の変動幅が小さく、安定的となったことが分かる。これは、2022年4月以降、花粉フィルターを除去したことによる風量の増加や、クレセント錠を使用し始めたことにより、二重窓内部の気密性が増加し、通気が比較的安定して行われたことが理由として挙げられる。2023年1月～3月ではDI4が概ね $1.2 \sim 1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の範囲で推移しており、他室と比較すると約 $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 大きい結果となった。これは、DI4の位置する和室4.5畳・南は他室と比較しても室内外環境温度差が小さく、二重窓内部の熱回収が不十分となった可能性が考えられる。夏期では、室内外の環境温度差が0に近づくことや窓開け換気が併用されることから、 U_{dyn} 値の変動幅が大きくなる傾向が見られる。しかしながら、 U_{dyn} 値が U_w 値を下回る期間が多いため、DI窓による断熱改修は冬期だけでなく、夏期においても外気と室内の温度差による熱流入を抑制し、冷房負荷を抑えることができるため有効であると言える。

3.2 各月の U_{dyn} 値出現度数分布

図7にDI2における各月の U_{dyn} 値出現度数分布を示す。和室6畳はエアコンが設置されており、暖房により室温が高く安定していることや、窓の開閉がほとんど無い。そこで、 U_{dyn} 値の月ごとの傾向を把握するため、DI2の結果を確認する。なお、2022年4月～6月のグラフについては、期間中の大部分にて欠測していたことから省略する。暖房期である12月および1月～3月では、概ね正規分布となり、 U_{dyn} 値の最頻値は $1.1 \sim 1.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の間の範囲にあり、 U_w 値と比較すると二重窓内部への通気によ

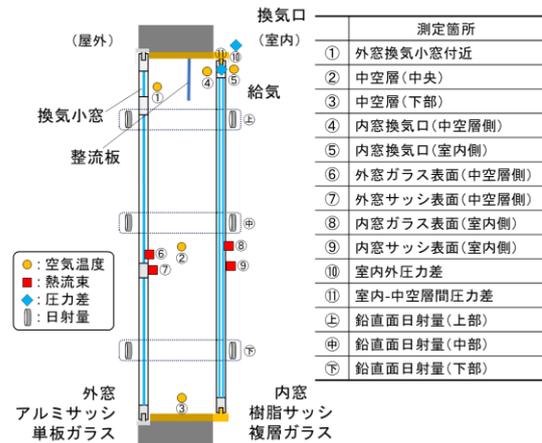


図3: DI窓における測定項目および測定点

$$U_{dyn} = \frac{Q_W}{A_W \cdot \Delta T} = \frac{(Q_F A_F + Q_G A_G)}{(A_W \cdot \Delta T)} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

Q_W : 窓面の熱流量 [W]
 A_W : 窓面積 [m²]
 ΔT : 室内外の環境温度差 [K]
 Q_F : フレーム部の熱流量 [W]
 A_F : フレーム面積 [m²]
 Q_G : ガラス面の熱流量 [W]
 A_G : ガラス面積 [m²]

図4: DI窓の動的な熱貫流率 U_{dyn} 値の算出方法

$$\eta_{dyn} = \frac{(Q_{TIN} + Q_{WIN} + Q_{airflow}) / A_W - U_{dyn} \cdot \Delta T}{Q_{solar}}$$

Q_{TIN} : 窓面透過日射量 [W/m²]
 Q_{WIN} : 窓面侵入熱流量* [W/m²]
 $Q_{airflow}$: 換気による取得熱 [W]
 A_W : 窓面積 [m²]
 U_{dyn} : 夜間の動的な熱貫流率 [W/(m² · K)]
 ΔT : 室内外の環境温度差 [K]
 Q_{solar} : 窓面日射量 [W/m²]
* 侵入熱流量はガラス面(Q_{wg})とフレーム面(Q_{wf})の実測値を面積加重平均した値

図5: DI窓の動的な日射熱取得率 η_{dyn} 値の算出方法

り概ね $0.9 \sim 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 改善されたことが分かる。また、 U_{dyn} 値の最頻値は、対象住戸において室内外環境温度差が最も大きくなる1月における数値が最も良くなる傾向にあり、2022年1月では $1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、2023年1月では $1.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ となった。冬期から春期に近づくにつれ、 U_{dyn} 値の最頻値は、わずかに大きくなる傾向が見られ、春期における U_{dyn} 値の最頻値は、冬期と比較すると概ね $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 劣る結果となった。夏期においては、概ね二峰性の分布となる傾向が見られた。図8に2023年7月～9月における室内外の環境温度差と U_{dyn} 値の関係を示す。夏期において、室内の外環境温度差がマイナスとなる場合、 U_{dyn} 値は概ね $0.1 \sim 1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であり、小さい値の範囲に広く分布する傾向が見られた。このことから、夏期における U_{dyn} 値出現度数分布は室内外の環境温度差により、二峰性の分布を形成すると考えられる。室内外の環境温度差がマイナスとなる場合の U_{dyn} 値の最頻値は、 $0.4 \sim 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の範囲にあり、7月の方が8月よりもわずかに U_{dyn} 値が小さくなる傾向が見られた。また、 U_w 値と比較すると二重窓内部への通気により $1.8 \sim 1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 改善されたことが分かる。室内外環境温度差がプラスとなる場合の U_{dyn} 値の最頻値は、概ね $1.2 \sim 1.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の範囲にあり、 U_w 値との差は概ね $0.7 \sim 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ である。9月における U_{dyn} 値の出現度数分布は2022年と2023年で異なる

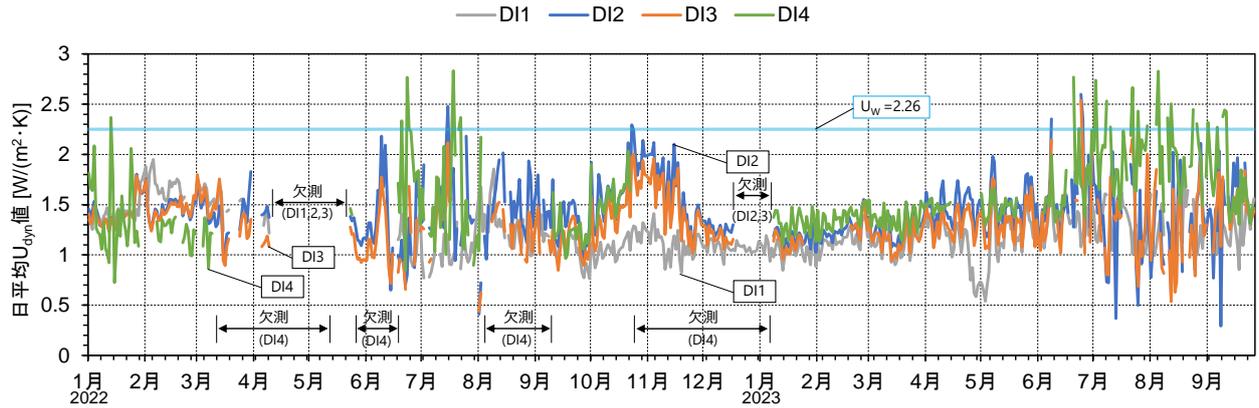


図6：各DI窓における日平均 U_{dyn} 値の変動

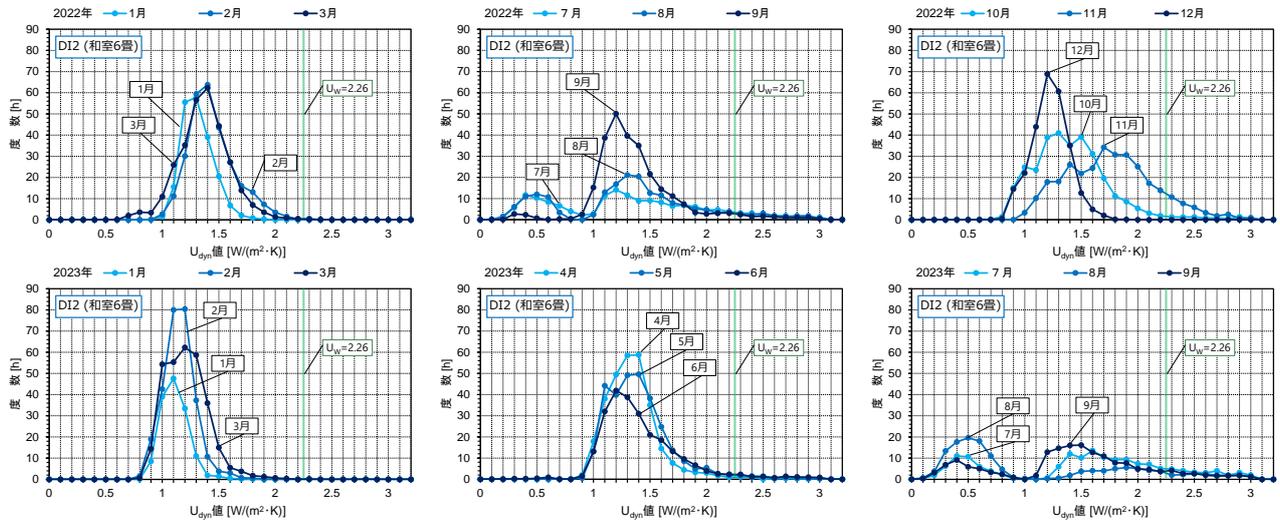


図7：DI2における各月の U_{dyn} 値出現度数分布

傾向となったが、これは2022年と2023年では、冷房期間がわずかに異なり、2022年9月では室内の外環境温度差がマイナスとなる時間がわずかであったことが原因である。

3.3 DI窓の換気による取得熱

図9にDI4内障子側における日平均 $Q_{airflow}$ の変動を示す。なお、 $Q_{airflow}$ は日射のある時間として $Q_{solar} \geq 200 \text{ W/m}^2$ に対して評価を行う。DI窓の換気による取得熱は、冬期に最大となり、その後、春期に低下して夏期に最小となり、秋に上昇する年変動を示している。これは、太陽高度が関係しており、太陽高度の低い冬期では、DI窓に直達日射が当たる面積が大きく、中間層で空気が暖められやすく、太陽高度の高い夏では、バルコニーや窓の厚みによる庇効果などにより、直達日射が遮られるため、換気による取得熱は小さくなる。暖房使用期間である11月～1月の換気による取得熱は概ね100Wであり、暖房負荷の削減が見込まれる。冷房使用期間である6月～8月は概ね50Wである。

3.4 太陽光入射角度と η_{dyn} 値の関係

図10にDI窓に対する太陽光入射角度(プロファイル角)と η_{dyn} 値の関係を示す。なお、 η_{dyn} 値の算出にあたり、屋外側の日射量 (Q_{solar}) に対する制限は設定していない。入射角が 35° 未満では、 η_{dyn} 値は0.5～0.7の範囲に集中する。一方、入射角が 35° 以上 65° 未満では、室内側の日射計に直達日射が当たらず、 η_{dyn} 値は0.1～0.3の範囲に集中する。 65° 以上では、 η_{dyn} 値を天空成分

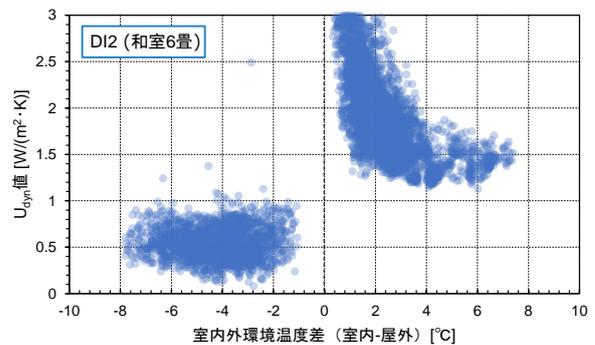


図8：2023年夏期における環境温度差と U_{dyn} 値の関係

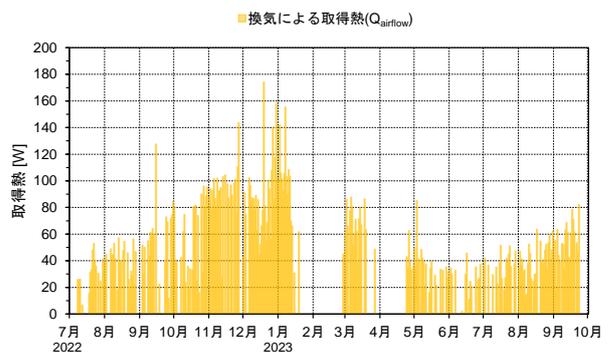


図9：DI4内障子側における日平均 $Q_{airflow}$ の変動

や反射成分のみで算出する状態であり、プロットは広く分布するものの、概ね0.4~0.6の範囲に集中する。全体を通して、窓面に対する入射角が大きくなるほど、 η_{dyn} 値はわずかに小さくなる傾向にある。これは、ガラスの入射角特性が影響しており、今後は数値補正などについても検討が必要である。また、入射角が15~30°と小さい場合、 η_{dyn} 値は概ね0.65であるが、入射角が18°付近のみ、0.5程度まで低下する傾向が見られる。これは、窓表面にある熱流センサーのコードにより、日射計の一部が隠れたことが影響していると考えられる。

3.4 日射量と η_{dyn} 値の変動

図11に冬至に近く快晴であった2022年12月23日における日射量と η_{dyn} 値の変動を示す。8時から外壁に直達日射が当たる11時までの η_{dyn} 値は天空成分や反射成分のみで算出された値であり、0.4~0.6の範囲にある。11時~12時は、外壁のみ直達日射が当たる時間であり、 η_{dyn} 値の評価に使用することはできない。12時以降は前述のコードの影響を受けている時間を除き、 η_{dyn} 値は概ね0.6である。

図12に冬至に近く曇天日であった2022年12月17日における日射量と η_{dyn} 値の変動を示す。8時から14時までで0.5~0.75の範囲にある。また、12時~14時の η_{dyn} 値は概ね0.6で安定している。快晴日と比較すると η_{dyn} 値は不安定となる傾向が見られるが、曇天日においても η_{dyn} 値の算出は可能である。

図13に2022年12月21日における日射量と η_{dyn} 値の変動を示す。晴天日であったが、雲が多く、計測された屋外側日射量は、変動幅が大きく不安定である。そのため、雲が多い日は、実測環境における直達日射を対象とした η_{dyn} 値の算出は困難である。

4. まとめ

本研究では、DI窓の性能評価を目的として、年間を通じた実測結果からDI窓の動的な熱貫流率(U_{dyn} 値)や動的な日射熱取得率(η_{dyn} 値)を算出し、分析を行った結果について報告した。

以下に得られた知見をまとめる。

- 暖房期である12月および1月~3月では、 U_{dyn} 値は概ね正規分布となり、最頻値は1.1~1.4 W/(m²·K)の間の範囲にある。
- 室内外の環境温度差がマイナスとなる場合の U_{dyn} 値の最頻値は、0.4~0.5 W/(m²·K)の範囲にある。
- 曇天日においても η_{dyn} 値の算出は可能であり概ね0.6であるが、雲が多い晴天の日には日射量が不安定で算出困難である。今後は太陽高度が高い夏期において、天空成分や反射成分を対象とした η_{dyn} 値を算出し、評価を行うほか、ガラスの入射角特性に対する数値補正を行う予定である。

謝辞

実測調査にあたり、前橋工科大学の堤洋樹准教授、特定非営利活動法人リデザインマネジメント研究所の近野成宏氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 三田村輝章 他：集合住宅へのダイナミックインシュレーション窓システムの適用 (その1) 群馬県前橋市内の公営住宅を対象とした冬期における実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学, pp.707-708, 2022年9月
- 2) 木村秀斗 他：集合住宅へのダイナミックインシュレーション窓システムの適用 (その2) 群馬県前橋市内の公営住宅を対象とした年間を通じた実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学, pp.1103-1104, 2023年9月
- 3) 木村秀斗 他：集合住宅におけるダイナミックインシュレーション窓による断熱改修に関する研究-群馬県前橋市内の公営住宅を対象とした現場実測による性能評価-群馬県前橋市内の公営住宅を対象とした年間を通じた実測結果、令和5年度日本環境管理学会大会学術講演梗概集、

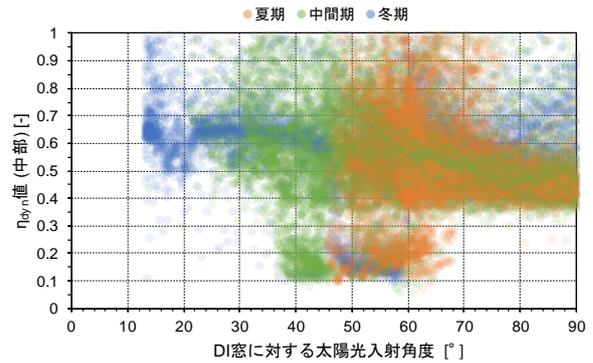


図10: DI窓に対する太陽光入射角度と η_{dyn} 値の関係

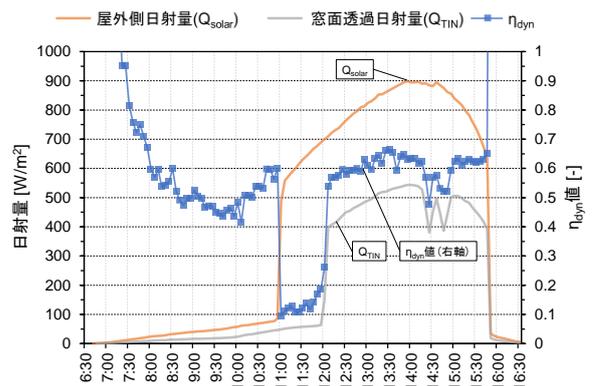


図11: 2022/12/23における日射量と η_{dyn} 値の変動

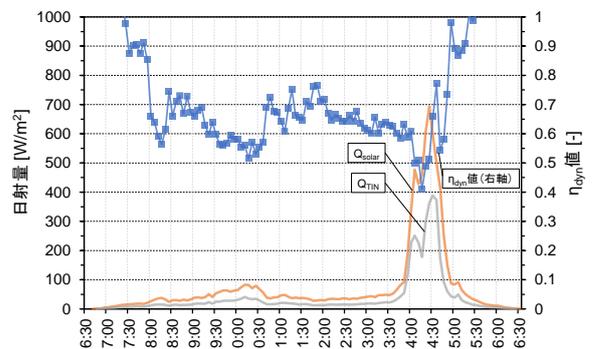


図12: 2022/12/17における日射量と η_{dyn} 値の変動

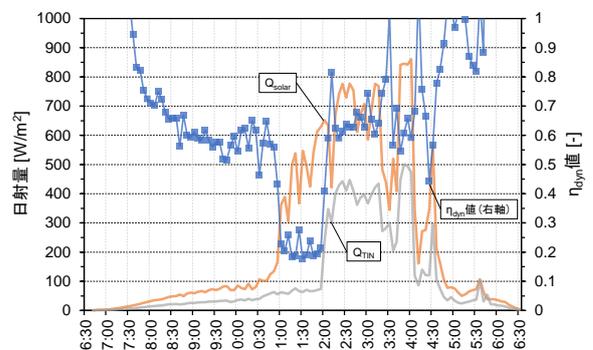


図13: 2022/12/21における日射量と η_{dyn} 値の変動

2023年11月

- 4) 木村秀斗 他：集合住宅へのダイナミックインシュレーション窓システムの適用 (その3) 群馬県前橋市内の公営住宅を対象とした年間を通じた η_{dyn} 値の実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学, pp.1103-1104, 2024年9月