

太陽電池一体型外装材の開発

Development of Façade-integrated Photovoltaic System

田中 規敏 Kitoshi Tanaka*1 徳村 朋子 Tomoko Tokumura*1 黒木 友裕 Tomohiro Kuroki*2

梗概

建物外装において、適度な日射遮蔽による空調負荷削減と自然採光による照明負荷削減といった「消費エネルギー削減」と、太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する「創エネルギー」を両立する技術として太陽電池一体型外装材（以下、PVルーバー）を開発した。実大モックアップによる性能測定を実施し、各季節における発電特性や日射透過率等を把握した。また、実測結果からPVルーバーの発電特性をモデル化し、ペリメータ部における年間エネルギー計算を実施し、ルーバー角度が電力消費量および発電量に及ぼす影響を評価した。

キーワード：太陽電池，外ルーバー，ルーバー制御，昼光利用，省エネルギー

Summary

We developed façade-integrated photovoltaic system (PV louvers) that has the following functions; energy saving, such as cooling load reduction by shading louver and lighting power reduction by using daylight; energy creation by photovoltaic. The field tests of the PV louvers installed in actual building façade were conducted to confirm the PV generator characteristics and solar transmittance with seasons. The measurement result was reflected on the PV generator characteristics, we simulated annual energy consumption of the perimeter zone. we evaluated how the louver angle influences the quantity of power generation and the power consumption of air-conditioning and illumination.

Keywords: photovoltaic, outside louver, low friction, louver control, daylight, energy saving

1 はじめに

地球温暖化問題が広く意識付けられた今、日本のエネルギー消費量の3割以上を占める民生部門においても省エネルギーの強化が求められている。一般のオフィスビルでは、空調用と照明用とで消費エネルギーの過半を占めるのが現状であり、これらの低減がひととき重視されている。そう考えると、建物の外皮、とりわけ開口部は外界との熱と光のやりとりを制御する部位として重要である。一方で、建物の運用段階でのエネルギー消費量を削減し、限りなくゼロにする「ZEB（ゼロ・エネルギー・ビル）」の実現がそう遠くない将来普及すると想定されている。これを実現するためには、建物の省エネルギー化とともに、太陽光発電等の再生可能エネルギーを積極的に導入する必要がある。しかし太陽光発電の場合、建物の屋上等水平面への設置だけでは設置できる容量に限界があり、特に床面積に対する屋上面積の小さい高層建物では、ZEB化は非常に困難な状況である。建物の屋上のみならず、外装部（鉛直面）においても導入可能な太陽光発電システムへのニーズは高まると考えられる。開発した「太陽電池一体型外装材（以下、PVルーバー）」は、適度な日射遮蔽による空調負荷削減と自然採光による照明負荷削減といった「消費エネルギー削減」と、建

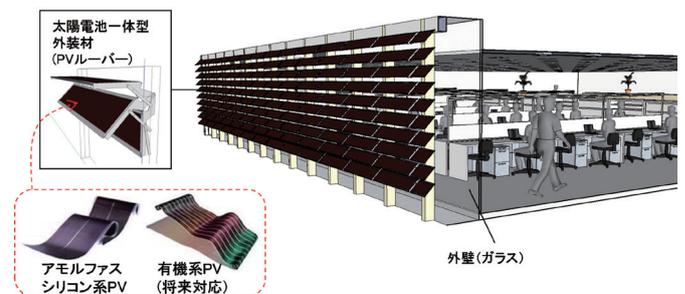


Fig. 1 PVルーバー概念図
Image of PV louver

*1 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute
*2 技術研究所 環境計画部 環境設備グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

物が受照する太陽エネルギーを電気エネルギーに変換する「創エネルギー」とを両立する技術として位置づけられる。Fig. 1に概念図を示す。本報では、開発したPVルーバーの概要とモックアップを用いたフィールド試験結果を報告し、特に太陽電池の発電量に影響を与える諸要因について分析した結果について報告する。

また、これらの試験結果から得られた発電特性を数式化し、標準的なオフィスビルにおける年間エネルギーシミュレーションを行い、太陽電池一体型外装材の省エネルギー効果を試算した。

2 フィールド試験の概要

2.1 実大モックアップの概要

Fig. 2にPVルーバーを構成する太陽電池と基材との一体化概念図を示す。PVルーバーの実大モックアップを2014年3月に既存建物外部に設置した。外観写真をFig. 3に、立面・断面図をFig. 4に示す。設置場所は、周囲に太陽光を遮蔽する建物のない外壁面（真南より約18°東向き）である。1ブロックあたり12枚×3列＝36枚（各ルーバーは全て並列接続）で構成される可動式PVルーバーを1ストリングとして、2ブロック設置した。1ブロックあたり定格出力は、22W/枚×36枚で792Wである。

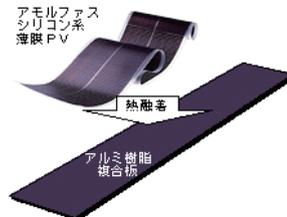


Fig. 2 PVと基板の一体化
 Explanation of thin film photovoltaic integrated into board



Fig. 3 PVルーバーの設置状況
 Installation state of PV louver

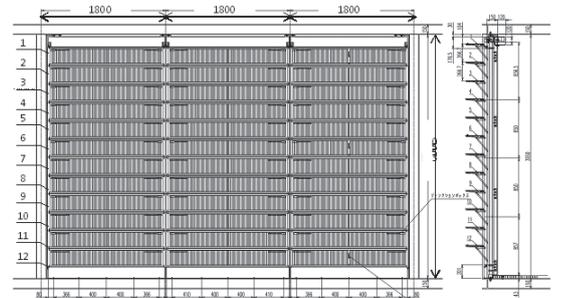


Fig. 4 実大モックアップ立面・断面図
 Elevation and section of full scale mock-up

2.2 測定概要

Table 1に主な測定項目を示す。測定は2014年3月より1分間隔で行った。PVルーバーはルーバー制御盤より、ブロック毎に15°ピッチでルーバー角度を変更でき、月毎に時刻に応じた角度制御を行うことができるが、各ルーバー角度における季節毎の特性を把握するために、測定期間においては数日おきに手でルーバー角度を変更して試験を行った。

2.3 測定結果

(1) 年間を通じての発電実績

Fig. 5にルーバー設置外壁面における月積算日射量とA,B各ブロックの月積算発電量（窓面1mあたり）の推移を示す。太陽高度の高い夏期（5月～8月）よりも太陽高度の低い冬期（11月～2月）の方が、PVルーバーを設置している南外壁面の受照日射量が大きいため、発電量も大きいことがわかる。Aブロックはルーバー角度を数カ月間固定して運用したのに対し、Bブロックは4月～5月および7月を除き、実験的にルーバー角度を日によって変更している。Aブロックのルーバー角度を0°（全開）、Bブロックを60°と固定した4、5月の発電量を見ると、Bブロックの発電量がAブロックよりも顕著に大きく、ルーバー角度が発電量へ影響を及ぼすことがわかる。

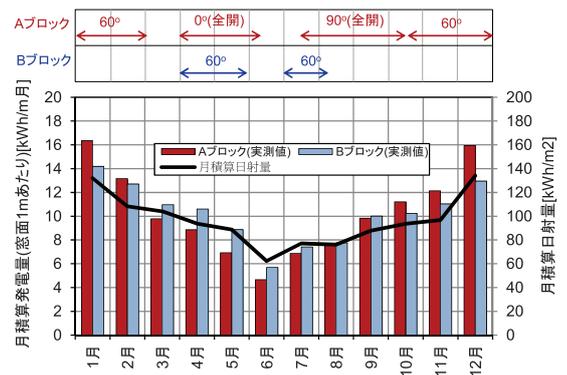


Fig. 5 各月の発電実績
 Result of monthly power generation

(2) 夏期測定結果

夏期の性能を検証するため、夏至前後の期間から比較の日射量の大きい日をルーバー角度ごとに選定し、代表日

Table 1 測定項目
 Measurement item

項目	点数	測定機器
外気温	1点	T型熱電対
鉛直面日射量	1点	小型日射計 (英弘精機 ML-01)
鉛直面照度	1点	照度計付ワイヤレスデータロガー (T&D RTR-574-H)
ルーバー表面温度	2点 (各ブロック1点)	T型熱電対
ルーバー面受照日射量	6点 (各ブロック3点)	小型日射計 (英弘精機 ML-01)
中空層鉛直面日射量	10点 (各ブロック5点)	小型日射計 (英弘精機 ML-01)
中空層鉛直面照度	10点 (各ブロック5点)	照度計付ワイヤレスデータロガー (T&D RTR-574-H)
直流電圧	2点 (各ブロック1点)	計測端末 (ラプラスシステム Solar Link ZERO)
直流電流	2点 (各ブロック1点)	計測端末 (ラプラスシステム Solar Link ZERO)

とした。Fig. 6(a), (b), (c)に夏期代表日の測定結果を示す。Fig. 6(a)よりルーバー面への入射日射量は、上部ルーバーによる日影の生じないルーバー角度90°のとき最大となった。一方、日積算発電量はルーバー角度75°のとき最大となり、ルーバー角度によって発電性能が異なることがわかる。発電性能を評価するため、Fig. 6(b)に各ルーバー角度におけるPR値（システム出力係数）を示す。ここで、PR値は式(1)により算出される値であり、ある評価期間内に太陽電池アレイ面に入射した日射量を基準とした太陽光発電システムの理想的な発電量に対して、実際にシステムから得られた発電量がどの程度の割合であったかを示す指標である。

$$PR = \frac{E_{use} / P_0}{H_I / G_s} \quad (1)$$

E_{use} : システム出力電力量 [kWh]

P_0 : 定格アレイ出力 [kW]

H_I : アレイ面日射量 [kW/m²]

G_s : 基準アレイ面日射強度 [kW/m²]

Fig. 6(b)では日平均値は0:00~24:00、日中平均は10:00~12:00の平均値としてPR値を示した。図より、日平均PR値はルーバー角度45°のとき、日中平均PR値はルーバー角度75°のとき最大であった。

Fig. 6(c)にルーバー前後の鉛直面日射量・鉛直面照度の比より算出した日射透過率および可視光透過率を示す。ルーバーを閉鎖状態に近づけることで、日射および可視光透過率が減少していくことが確認できる。太陽高度の高い夏期においては、ルーバーを全開としていても直達日射を遮ることができるため、日射透過率、可視光透過率とも比較的低い結果となった。

(3) 冬期測定結果

冬至前後の期間から比較の日射量の大きかった日を選定し、晴天代表日とした。Fig. 6(d), (e), (f)に冬期代表日の測定結果を示す。Fig. 6(d)よりルーバー面日射量は、ルーバー角度90°のとき最大となる一方、日積算発電量はルーバー角度60°のとき最大となった。Fig. 6(e)よりPR値は日平均値、日中平均値とも角度60°のとき最大となることを確認できる。Fig. 6(f)よりルーバーを全開とした場合には約50%の日光がルーバー内側の中空層に入射しているのに対し、ルーバー角度を45°以上とした場合には、日射および可視光透過率は10%程度となっていた。

(4) 発電量へ影響を与える諸要因の検証

太陽電池セルの出力特性として、温度依存性、照射強度依存性、入射角依存性などが知られている。そこでPVルーバーの発電量とセル温度、照射強度（入射日射量）、直達日射入射角との関係について検証した。Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9に冬期代表日のPR値と諸要因との関係を示す。Fig. 7よりPV表面温度上昇時の出力低下率は0.25%/℃であり、

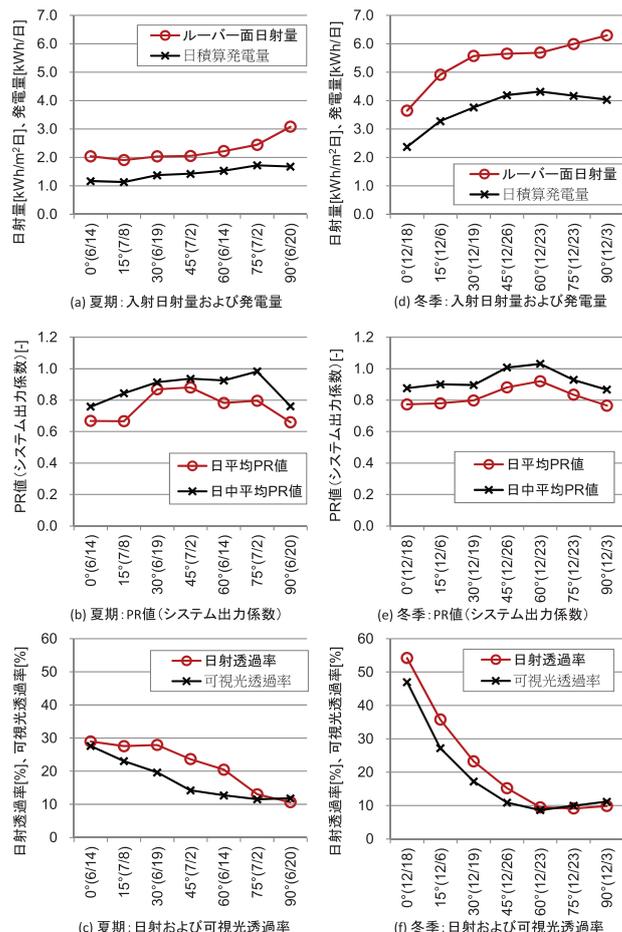


Fig. 6 夏期・冬期代表日の測定結果
Measurement Results in a typical day in summer and winter.

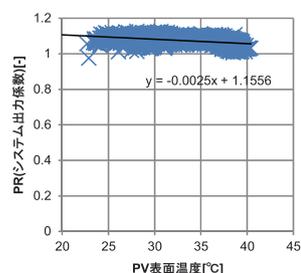


Fig. 7 PV表面温度とPR値
Surface temperature and PR value

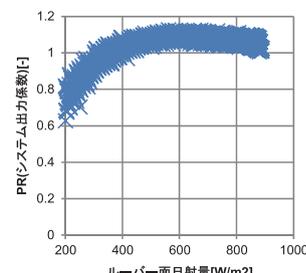


Fig. 8 照射強度とPR値
Irradiation intensity and PR Value

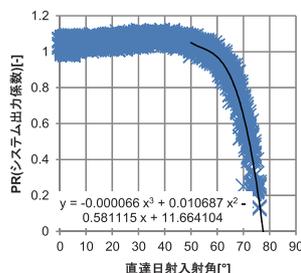


Fig. 9 直達日射入射角とPR値
Angle of incidence and PR value



Fig. 10 直達日射入射角の定義方法
Explanation for angle of incidence

一般的な結晶系シリコンの0.4~0.5%/℃と比較すると小さい結果であった。Fig. 8より照射強度低下時の出力低下が確認でき、入射日射量が400W/m²を下回るとPR値が低下する特徴がある。またFig. 9より、直達日射入射角（定義方法をFig. 10に示す）が50°以上となる場合にPR値が低下することが確認された。これは、入射角が90°に近いほど、セルを保護するETFEフィルム表面にて光が反射され、セルへ到達する光が小さくなるためと考える。

3 省エネ効果に関する検討

3.1 解析概要

実測結果から得られた発電特性を数式化し、シミュレーションモデルに反映して太陽電池一体型外装材の省エネルギー効果を試算した。PVルーバーの発電量および日射遮蔽効果、昼光照度の計算にはDAYSIM¹⁾を用いた。発電量とPVセルの各出力特性（セル温度、照射強度、直達日射入射角）の関係は、前節のフィールド試験結果よりTable 2のように数式化し、PVセルの受照日射量から発電量を算出した。なお、発電に影響を及ぼすセル温度はTable 3に示すようにPVルーバー断面における熱収支式により求めた。東京にある一般オフィスビルを対象とし、ペリメータ（幅1m×奥行5m）で消費される年間の電力消費量（空調・照明）および発電量を計算した。解析対象とするペリメータ断面をFig. 11に示す。比較ケースとしてLow-E複層ガラス+内ブラインドを外装とした場合（以下、比較システム）についても計算を行い、南面にPVルーバーを設置した場合を比較した。Table 4に計算条件を示す。照明電力消費量の算出にあたっては、昼光照度が設計照度を下回る位置では人工照明によって均一に設計照度に調光されると仮定し、調光による照明用電力は照明照度に比例するものとした。なお、PVルーバーは15°毎に

Table 2 発電量計算式
Formula to estimate output power of PV

$$P = \eta \cdot P_c \cdot I_{pv} / 1000$$

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_t \cdot \eta_a \cdot \eta_{pcs}$$

η_i : 照度特性効率[-]は、下式にて近似。
 $I_{pv} < 100$ の時, $\eta_i = 0$
 $100 < I_{pv} < 400$ の時, $\eta_i = 0.915733 + 0.000211 \cdot I_{pv}$
 $400 < I_{pv}$ の時, $\eta_i = 1$
 η_t : 温度特性効率[-]は、下式にて近似。
 $\eta_t = 1 - 0.0015 \cdot (t - 25) - 0.000017 \times (t - 25)^2$
 η_a : 日射入射角特性効率[-]は、下式にて近似。
 $\eta_a = -0.0000662 \cdot A^3 + 0.0106873 \cdot A^2 - 0.5811145 \cdot A + 11.612475$
 ここで、
 P : 発電量[Wh], P_c : 定格出力[W],
 I_{pv} : 受照日射量[Wh/m²], t : セル温度[℃],
 A : 直達日射入射角[°], η : 発電効率[-],
 η_i : 照度特性効率[-], η_t : 温度特性効率[-],
 η_a : 日射入射角特性効率[-],
 η_{pcs} : パワーコンディショナ変換効率[-] (= 0.85)

Table 3 PVルーバー断面における熱収支式
Heat balance model of PV louver section

$$\alpha_o(\theta_o - \theta_i) + \frac{1}{r_1}(\theta_2 - \theta_1) = 0$$

$$a_o I_o + \frac{1}{r_1}(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{r_2}(\theta_3 - \theta_2) = 0$$

$$\frac{1}{r_2}(\theta_2 - \theta_3) + a_i I_i + \alpha_i(\theta_1 - \theta_3) = 0$$

θ_o : 外気温[℃], θ_i : 中空層温度[℃]
 θ_1 : 表面温度[℃], θ_2 : 日射吸収面温度[℃],
 θ_3 : 裏面温度[℃]
 α_o, α_i はユルゲスの実験式にて算出
 $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ ($\alpha_r = 4.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ 一定)
 外部風速 $v < 5 \text{ m/s}$ の時: $\alpha_c = 5.8 + 3.9v$, $v > 5 \text{ m/s}$ の時: $\alpha_c = 7.1(v/3)^{0.78}$
 r_1 : 表面-アルポリック間熱抵抗[m²K/W]
 r_2 : アルポリック-裏面間熱抵抗[m²K/W]
 a_o : 日射吸収率0.89(電気エネルギーに変換する発電分は含まない)[-]
 a_i : 吸収率0.19[-]
 I_o : 表面受照日射量[W/m²], I_i : 裏面受照日射量[W/m²]

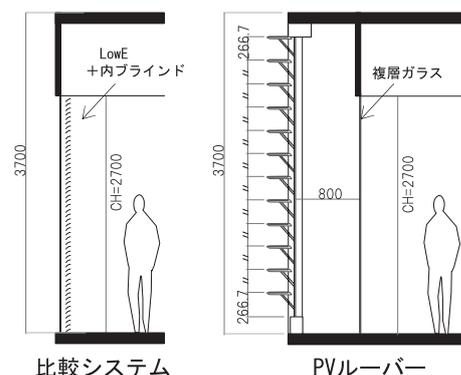


Fig.11 解析対象とするペリメータ断面
Section view of analysis target perimeter

Table 4 計算条件
Analysis condition

気象条件	東京標準年 ²⁾	
窓面方位	南面	
年間稼働日数	245日	
運転時間	12時間 (8:00~20:00)	
設定室温	26℃; 夏期(6月~9月) 22℃; 冬期(12月~2月) 24℃; 中間期(4月~5月, 10月~11月)	
設計照度	750 lx (作業面FL+0.7m)	
天井・壁・床 反射率	80%, 50%, 30%	
外壁	複層ガラス (PVルーバー)	遮蔽係数SC=0.89, 熱通過率K=3.4 W/m ² K ガラス透過率 76%
	LowE+内ブラインド	遮蔽係数SC=0.34, 熱通過率K=1.5 W/m ² K ガラス透過率 65%
照明電力	15W/m ² (調光制御なし・設計照度時)	
内部発熱	人体: 10W/m ² , 機器: 15W/m ²	
空調機器	冷房COP: 3.2, 暖房COP: 3.5	

角度変更可能なため、各ルーバー角度で固定した場合とルーバー角度可変とし、発電優先制御および保護角制御、消費電力最小制御を行った場合について試算した。

3.2 解析結果

年間発電量の解析結果を Fig. 12 に示す。また、月別に発電量が最大となるルーバー角度の割合を Fig. 13 に示す。ルーバー角度 60°、75° での発電量が大きく、発電量が最大となるようルーバー角度を制御する発電優先制御と比較しても大差がないことがわかる。同じ日射条件下では、発電量は太陽から見たルーバー面積に比例するため、60°、75° が最も太陽に正対するセル面積が大きいことを示している。

Fig. 14 に照明および空調電力消費量の結果を示す。当然ながらルーバー角度が 90°（全閉）に近づくほど、日光を室内へ取り入れることができなくなるため、照明電力消費量が大きくなる。一方で、空調電力消費量はルーバー角度が 90°（全閉）に近づくほど日射遮蔽効果が高くなるため、日射負荷が小さくなり、空調消費電力も小さくなる。なお、本解析条件では内部負荷が比較的大きく、冬期におい

てもほとんど暖房負荷がなかったため、冬期も日射遮蔽を行うことで空調（冷房）消費電力を削減できる結果であった。発電優先制御時は、Fig. 14 に示すようにほとんどの時間帯でルーバー角度 60°、75° となるため日光利用による照明電力削減効果は小さいが、日射遮蔽による空調削減効果は大きい。直射日光を遮蔽し間接光を利用する保護角制御では、照明電力は削減されるが、空調負荷は大きくなることがわかる。

Fig. 15 に照明・空調の電力消費量から発電量を差し引いた電力量が最小となるルーバー角度の出現頻度を示す。発電量が最大となる 60°～75° が 50% 以上の時間を占めるものの、太陽高度の高い夏期は発電優先制御と比較して 0°～15° の時間帯が増加する。Fig. 16 に PV ルーバーの年間電力消費量および発電量の計算結果を、比較対象とした LowE+内ブラインドの場合（以下、比較システム）の結果とともに示す。なお、グラフの右縦軸は、電力消費量を

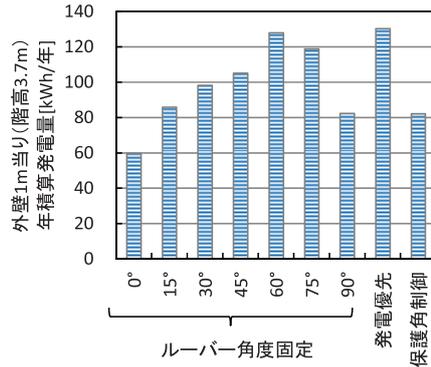


Fig. 12 年間発電量
Result of annual power generation

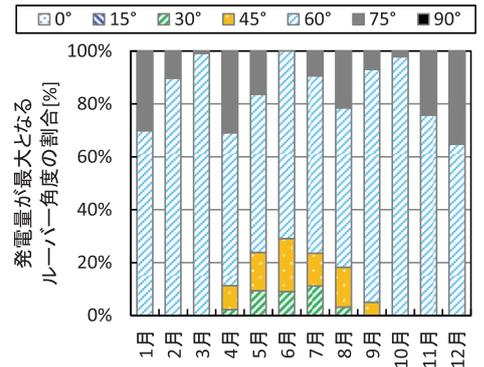


Fig. 13 発電量が最大となるルーバー角度の割合
Rate of louver's angle which power generation is maximum

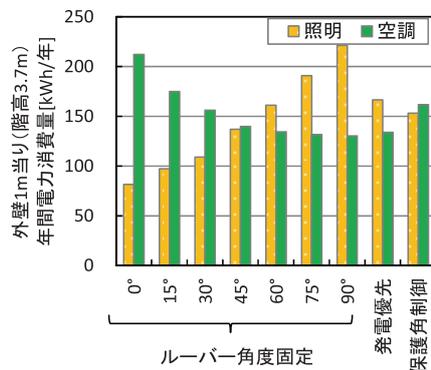


Fig. 14 年間電力消費量
Result of annual power consumption

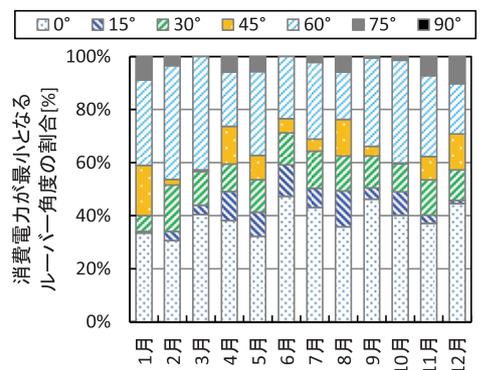


Fig. 15 年間電力消費量（消費電力量－発電量）が最小となるルーバー角度の割合
Rate of louver's angle which the annual power consumption (subtracting power generation) is minimum

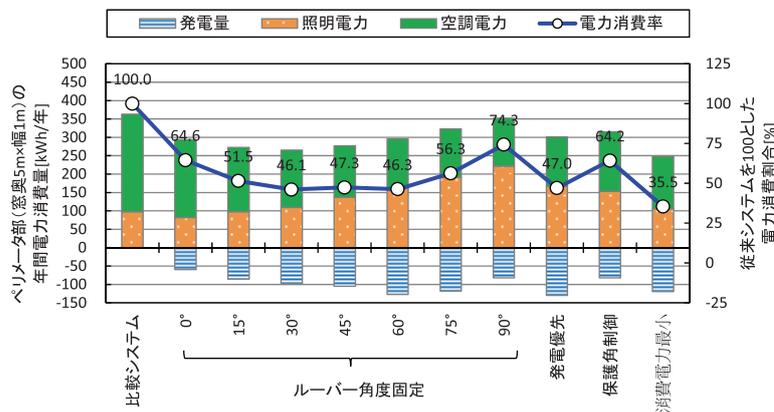


Fig. 16 比較システムおよびPVルーバーの年間電力消費量
Annual power consumption of comparing system (low E glass & internal blinds) and PV louver

空調・照明電力量から発電量を差し引いた分とし、比較システムの電力消費量を100とした割合で示している。図より、ルーバー角度を60°に固定した場合で電力消費量は比較システムの46%程度であった。また、消費電力最小にするルーバー角度で制御した場合、空調・照明電力消費量ともに小さく抑えられており、かつ発電量も発電優先制御と大差がない。従来システムと比較して電力消費量は、60%以上削減される結果であった。ルーバー角度を季節・時間・気象条件に応じて制御することで、ペリメータにおけるエネルギー消費量を大幅に削減できることを確認した。

4 まとめ

可動式外ルーバーと薄膜太陽電池を一体化させたPVルーバーを開発し、実大モックアップによる性能評価を行い、各季節における発電特性や日射透過率等を把握した。発電量へ影響を与える諸要因の検証を行った結果、セル温度や照射強度に加え、ルーバーへの直達日射入射角によってPR値が変化することを確認した。これらの試験結果を解析に反映させた年間エネルギーシミュレーションにより、ルーバー角度を消費電力が最小になる最適条件で運用した場合には、従来システムと比較して電力消費量の削減量は65%程度であり、ルーバー角度制御を適切に行うことでペリメータの電力消費量を大幅に削減できることを示唆した。今後、運用データを整備して発電性能の経年劣化を観測するとともに、ルーバー角度制御に伴う視環境変化について評価し、快適性を損なわない制御手法を確立することが課題である。

謝辞

本研究開発は、環境省の平成25年度～平成26年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（太陽電池一体型外装材及び直流給電による自立型エネルギー需給システムの技術開発）の委託を受けて実施したものです。本研究開発の遂行にあたり多大なご指導、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) <http://daysim.ning.com/>
- 2) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ1981-2000