

学校施設におけるエネルギー消費の現状分析と 省エネ対策の効果検証

神戸女学院高等学部

門 脇 さ つ き

1. 序 論

近年、気候変動の深刻化に伴い、国際社会では、パリ協定やIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の「1.5℃特別報告書」において、温室効果ガスの大幅削減が求められている。日本においても2050年カーボンニュートラルの実現を掲げているが、再生可能エネルギーの比率は約20%にとどまっており、エネルギー源の脱炭素化だけでなく、省エネルギー（以下省エネ）の推進が急務である。

こうした社会的背景を踏まえ、筆者が多くの時間を過ごす学校施設に注目した。工場などの大規模施設では、エネルギー管理の専門職により、効率化が徹底されている一方、学校施設では、そのようなエネルギー管理者がおらず、省エネのポテンシャルが高いと予測される。さらに、省エネ対策が実施されれば、環境・エネルギー教育の実践の場ともなりうる。

そこで本研究では、神戸女学院中高部を対象に、電力およびガスのエネルギー使用量を分析し、建物ごとの特徴や用途別の傾向を明らかにする。その上で、省エネルギーと学習環境の両立を可能にする改善策を検討し、今後の持続可能な学校運営への示唆を得ることを目的とする。

2. 学校施設3棟におけるエネルギー使用量分析

〈2・1〉 研究対象

対象期間：2024年1月～12月

対象施設：神戸女学院中高部の建物3棟

例年5月上旬から半ばに暖房から冷房へ、11月中旬に冷房から暖房に切り替える。

各建物の位置関係は右の地図のようにになっている（上部が北）。（引用）神戸女学院中高部ホームページ

窓はどの建物も一重窓であった。

その他に以下の資料の情報（いずれも神戸女学院施設課提供）を用いた。

- ・建物別冷暖房機一覧：各建物に設置されている冷暖房機の種類を記載。用途分類に使用。
- ・ガス使用量：各建物ごとの月別ガス消費量（単位：m³）。エネルギー使用量の元のデータとして使用。葆光館、タルカット館は「冷暖房」と「非冷暖房（以後一般と呼ぶ）」に分けて計測されている。アンジー館は分けて計測されていない。
- ・使用電力表：各建物ごとの月別電力消費量（単位：kWh）。エネルギー使用量の元のデータとして使用。「冷暖房」と「一般」に分けて計測されている。
- ・各建物の床面積：各建物を比較するため、エネルギー使用量を床面積当たりで算出する際に使用した。

〈2・2〉 エネルギー使用量計算方法 一年間での使用量の推移および建物間の比較から、使用状況を考察するために、各建物の月ごとの床面積当たりのエネルギー使用量[MJ/m²]を、Excelを用いて求め棒グラフ化する。



表1 各建物の概要

建物	建築年	床面積 [m ²]	階数	用途	冷暖房機		
					熱媒種類	空調方式	設置年
アンジー・クルー館 (以後アンジー館)	1997	2448	4	高校の教室	冷温水・ガス	中央	2016
				準備室	冷媒・電気	個別	
葆光館	1933	4386	3	中学の教室・準備室等	冷温水・ガス	中央	2013
				準備室・会議室等	冷媒・電気	個別	
タルカット館	1979	3494	4	理科・家庭科・美術・書道の教室・準備室等	冷温水・ガス	中央	2012

表 2 各建物の断熱仕様の概要

建物	部位	使用されている断熱材
葆光館	全体	施工図面がないため不明。ただし、天井裏の目視確認では断熱材は見られず、屋上防水に断熱効果はないため、断熱はされていない可能性が高い。
タルカット館	最上階天井 (陸屋根部分)	スタイロフォーム 25 mm 打込みの上、パーライト 10 mm 吹付け
	屋根下 (一部周辺のみ)	防水モルタルの上にパーライトモルタル 60 mm 小手押さえ
	外壁	(施工図面に断熱材の表記なし)
アンジー館	教室の外壁	ウレタンフォーム吹付 (GL 工法) 20 mm か 25 mm (当時の状況からの推定値)
	共用部の外壁	パーライトモルタル 15 mm
	屋根	アスファルト断熱防水 RB ボード 25 mm
	教室・研究室の床材	ナラフローリング 15 mm フロア用ワトコオイル+ウレタン樹脂塗装 耐水ラワン合板 15 mm

単位換算は、省エネ法に基づき、「電力：1kWh=9.76MJ、ガス：1m³=45MJ」とした。

電力は、冷暖房と一般の電力使用量をそれぞれ床面積当たりのエネルギー使用量 [MJ/m²] に換算した。冷暖房については 5～10 月を冷房、11～4 月を暖房とした。

$$\begin{aligned} & \text{各月の電力のエネルギー使用量 [MJ/m}^2\text{]} \\ &= \frac{\text{各月の電力使用量 [kWh]} \times 9.76 [\text{MJ/kWh}]}{\text{床面積 [m}^2\text{]}} \end{aligned}$$

ガスは、冷暖房と一般のガス使用量をそれぞれ床面積当たりのエネルギー使用量 [MJ] に換算した。冷暖房については 5～10 月を冷房、11～4 月を暖房とした。

$$\begin{aligned} & \text{各月のガスのエネルギー使用量 [MJ/m}^2\text{]} \\ &= \frac{\text{各月のガス使用量 [kWh]} \times 45 [\text{MJ/kWh}]}{\text{床面積 [m}^2\text{]}} \end{aligned}$$

ただし、アンジー館のガス使用量については、冷暖房と一般に分かれておらず、その合計で計測されていたため、次の方法で冷暖房と一般の使用量を推定した。

一般のガス使用量は年間を通じて変動が小さいと仮定し、冷暖房の使用量がほぼないと推測される 4 月の使用量を各月の一般のガス使用量とした。そして、各月の総使用量からこの一般のガス使用量を差し引くことで、冷暖房のガス使用量を算出した。

$$\begin{aligned} & \text{各月の冷暖房のガスのエネルギー使用量 [MJ/m}^2\text{]} \\ &= \frac{(\text{各月のガス使用量} - \text{4月のガス使用量}) [\text{m}^3] \times 45 [\text{MJ/m}^3]}{\text{床面積 [m}^2\text{]}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{各月の一般のガスのエネルギー使用量} \\ &= \frac{\text{4月のガス使用量 [m}^3\text{]} \times 45 [\text{MJ/m}^3]}{\text{床面積 [m}^2\text{]}} \end{aligned}$$

〈2・3〉 エネルギー使用量計算結果 全棟において、夏期（7～9 月）の使用量は春期（4～5 月）の 2 倍以上。特にアンジー館では夏期の使用量が突出し、8 月の消費量が年間最大になっている。

1 年間の床面積当たり使用量は、多い順にアンジー館、タ

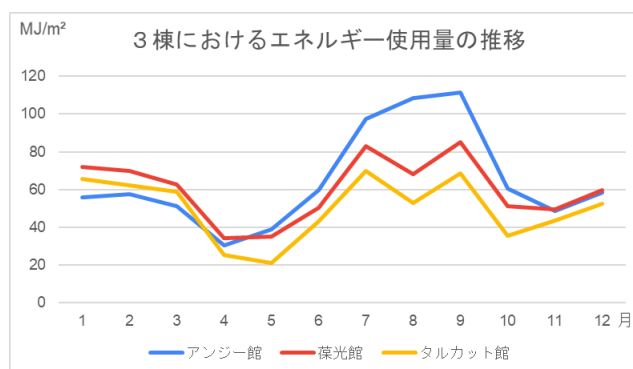


図 1 建物ごとのエネルギー使用量の変化

表 3 1 年間の床面積当たりエネルギー使用量の比較

	タルカット館	葆光館	アンジー館
1 年間の使用量	600 MJ	653 MJ	778 MJ
タルカット比	100% (基準値)	109%	130%

ルカット館、葆光館となった。

葆光館は最も古い建物であるが、エネルギー使用量が他の棟より極端に多いわけではない。つまりエネルギー効率が特に悪いわけではない。一方で、アンジー館は 3 割多くなっていた。

全棟において、エネルギー使用量は冬期（12～3 月）、夏期（7～9 月）に多くなる傾向にあるが、ガスの方が変動が大きい。

「冷房用のガス」と、「冷房用の電力」の使用量が、夏 6 月～10 月に増加している。

「冷房用のガス」「冷房用の電力」合わせて年間使用量の 40% が「冷房」に使われている。

アンジー館は夏期の冷房のエネルギー使用量が他の 2 棟と比べ著しく多く、タルカット館よりも 4 割多くなっていた。

アンジー館では 8 月のエネルギー使用量が 7 月と比べて増加した。

葆光館は 4 月と 5 月のガス使用が他の建物よりも多かった。

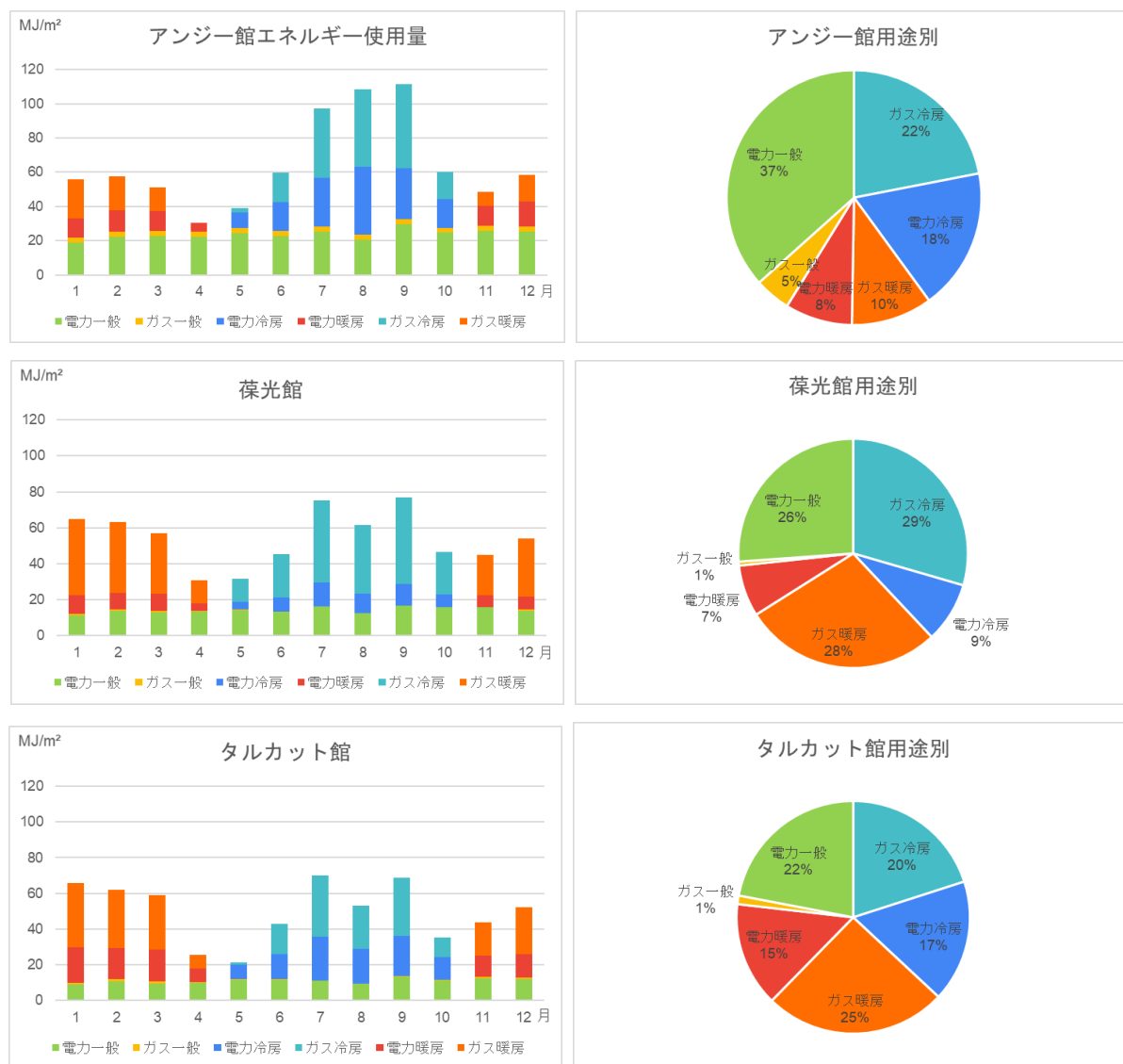


図2 左：建物ごとの月別・用途別（電力・ガス・冷暖房・一般）エネルギー使用量
右：建物ごとの年間・用途別（電力・ガス・冷暖房・一般）エネルギー消費割合

〈2・4〉 エネルギー使用量の考察 エネルギー使用量の建物による違いは、夏期に顕著であった。アンジー館は5月から10月にかけて他の2棟より増加しているが、8月には7月に比べてさらに差が開いていた。葆光館・タルカット館では、夏休み期間である8月の使用量が7月に比べ減少しているのに対し、アンジー館では8月の使用量が7月に比べ増加しているのは、夏休み期間中の文化祭準備や部活動などで、他棟に比べて冷暖房が活発に使用された可能性が考えられる。

さらに、アンジー館では8月を除く5月から10月にかけても他棟と比べ使用量が多くなっているのは、人による使用状況とは別の要因が影響していると考えられる。

アンジー館の年間使用量の用途別内訳から、アンジー館の省エネ対策を考える上では、年間使用量の40%を占める「夏の冷房エネルギー消費をいかに削減するか」が重要であることが分かる。

表4 春期（4月～5月）のガス、夏期（5月～10月）の冷房の電力・ガス使用量の比較

タルカット館	タルカット館	葆光館	アンジー館
夏期の冷房のエネルギー使用量（タルカット比）	基準値	123%	140%
7月から8月の冷房の電力・ガス使用量の変化	25%減少	16%減少	23%増加
春期ガス使用量	4月 7.8MJ 5月 1.6MJ	4月 15MJ 5月 14MJ	4月 3.0MJ 5月 5.5MJ

アンジー館の夏の冷房エネルギー使用が多い一因として、葆光館やタルカット館では南向きの窓からの日射を遮る木々や建物があるが、アンジー館ではそのようなものがないため、日射量による冷房負荷が大きいことが推定される。そのため、ひさしやカーテンなどで日射の侵入を防ぐ工夫が、省エネに効果的だと考えられる。

葆光館では、他棟と比べ4月と5月にガスの使用量が多い

が、4月と5月にも他棟と比べ冷暖房を活発に使用していた可能性が考えられる。

表2の断熱仕様の違いは、各建物のエネルギー消費特性に影響していると考えられる。

葆光館は無断熱であり、建物内部の熱が外部へ逃げやすいため、冬は暖房負荷が大きい一方、夏は冷房負荷が小さい。このことが、夏のエネルギー消費がアンジー館より低く抑えられた一因となったと推測される。

タルカット館は、夏の太陽の熱が最も多く入り込む屋根部分に断熱対策が施されている。これが、エネルギー消費量が3棟の中で最も少なかった要因の一つと考えられる。

アンジー館は、最も断熱・気密性能が高い。これは、冬には暖房負荷を減らす、夏には、冷房エネルギー消費が突出している現状と合わせて考えると、熱を室内に閉じ込めてしまい、冷房負荷を増大している可能性がある。

3. アンジー館の冷房負荷計算による省エネ対策の効果検証

〈3・1〉 冷房負荷の計算方法 「日射負荷が冷房エネルギー使用の増大に繋がっている」という仮説に基づき、窓からの熱を軽減する省エネ対策の効果を定量的に評価するために、冷房負荷の計算による検証を行った。

ここでは、アンジー館の教室（南向き・日射遮蔽なし）の夏7月の代表的な一日を対象に、「遮光用カーテン」と「高断熱複層ガラス（空気層12mm）」の2つの対策を仮定した。

冷房負荷は、窓を透過する日射熱、温度差により窓や壁を通過する熱、照明や人体からの発熱により構成され、「遮光用カーテン」は日射熱を、「複層ガラス」はガラス通過熱を小さくする。これらの冷房負荷を以下の物理式により計算し、対策なしと対策ありの場合の冷房負荷およびエネルギー消費量を比較した。

- ・ガラス窓透過日射熱： $I \times SC \times A$
 I ：ガラス窓標準日射熱取得 [W/m^2]
 SC ：遮蔽係数 SC
 A ：ガラス窓面積 [m^2]
- ・ガラス窓通過熱： $K \times A \times (T_0 - Tr)$
 K ：通過率 [$W/(m^2 \cdot K)$]
 A ：ガラス窓面積 [m^2]
 T_0 ：室外温度 [K]
 Tr ：室内温度 [K]
- ・壁体通過熱： $K \times A \times (T_0 - Tr)$
 K ：熱通過率 [$W/(m^2 \cdot K)$]
 A ：ガラス窓面積 [m^2]
 T_0 ：室外温度 [K]
 Tr ：室内温度 [K]

K は以下のように各層の熱伝導率と厚みから算出

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \sum_n \frac{\ell_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_i}}$$

表5 対策導入前後の冷房負荷平均値と削減率の計算結果

	対策なし	遮光用カーテン	高断熱複層ガラス
熱負荷平均値 [W]	3248	2711	2660
削減率 [%]	0%	16.5%	18%

負荷要因は大きい順に、人体発熱>ガラス窓透過日射熱>ガラス窓通過熱>照明発熱>壁体通過熱（ガラス窓通過熱・照明発熱・壁体通過熱は同程度）

K ：熱通過率 [$W/(m^2 \cdot K)$]

α_0 ：外表面熱伝達率 [m^2]

α_i ：内表面熱伝達率 [m^2]

ℓ_n ：第 n 層の厚さ [$W/(m^2 \cdot K)$]

λ_n ：第 n 層の材料の熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$]

・照明発熱：消費電力×個数

・人体発熱：発熱量×人数

各時刻（9時・12時・15時）の熱負荷を計算し、3時刻の平均を「熱負荷平均値」とし、対策なしの場合と対策ありの場合の比を出した。

1ヵ月床面積当たりエネルギー消費量 [MJ]

$$= \frac{\text{熱負荷の平均値} [W] \times 10 [\text{時間}] \times 20 [\text{日}] \times \text{教室数} \times 0.00976 [MJ/Wh]}{\text{空調機エネルギー消費効率} \times \text{床面積} [m^2]}$$

〈3・2〉 冷房負荷計算の結果と考察 最も大きな熱負荷の要因は「人体発熱」であり、外部からの影響を受けにくい固定的な負荷であった。

次に大きな要因は「ガラス窓透過日射熱」であり、これは建物の方位や遮蔽物の有無に大きく影響される。

照明発熱と壁・ガラスの通過熱はほぼ同程度であり、季節や建材の性能に左右される。

「遮光用カーテン」と「高断熱複層ガラス」の削減効果の差は小さく、いずれも有効な対策といえる。ただし、実際の導入を考慮すると、それぞれに長所と短所がある。遮光カーテンは施工コストが低く導入が容易であるため短期的に有効な対策であるが、室内が暗くなるという快適性への影響も考慮する必要がある。一方で、高断熱複層ガラスはより削減効果が高く恒久的な対策であり、長期的な視点では優位性があると考えられる。

ただし、これは夏の一部の時間帯の冷房負荷のみを計算している。実際のエネルギー消費には、一年を通した、冬の暖房や電気製品などの、さらに多様な条件が関係する。

4. エネルギーシミュレーションによる省エネ対策の効果検証

アンジー館を想定したモデルにおいて、複数の省エネ対策が年間のエネルギー消費量に与える影響をさらに詳細に評価するため、シミュレーションを用いた省エネ対策の効果検証を行った。

冷房負荷計算では扱わなかった、暖房負荷やその他のエネルギー消費も加味した、建物全体の年間エネルギー消費量を詳細に評価した。

〈4・1〉 シミュレーションの方法 大阪大学下田研究室の「業務部門建築エネルギーシミュレーションモデル」を用いた。このモデルは、一般的な学校施設の仕様をもとに、スケジュールや空調稼働割合などを再現し、30分単位で年間のエネルギー消費を計算できる。本研究では、このモデルを神戸女学院の条件に可能な限り近づけ、冷房負荷計算で仮定した「カーテン」や「複層ガラス」に加え、「外壁・床・屋根の断熱」、そして「全ての対策を同時に行った場合」の5つのシナリオを比較した。

モデルとアンジー館との延床面積の違いを補正するため、全ての比較は床面積あたりエネルギー消費量 $[MJ/m^2]$ で行う。シミュレーションの主な条件は以下の通りである。

- ・期間：2024年4月から2025年3月
 - ・地域：大阪
 - ・建物構成：教室、コンピューター教室（PC 45台）、教員室、ロッカー等
 - ・運転スケジュール：平日・長期休暇の利用実態を想定して設定
 - ・熱源：吸収式冷温水機
- 地域：大阪
年：2024年度
熱源：吸収式冷温水機
- ・スケジュール（平日）：
 - 教員室：7:30-19:00
 - 教室・ロッカー・共通部分：7:30-18:30
 - 特別教室 内 2/3：8:00-12:00, 13:00-16:00
 - 内 1/3：8:00-12:00, 13:00-18:00
 - ・スケジュール（長期休暇）：
 - 研究室：7:30-19:00
 - 教室・ロッカー・廊下（照明）：7:30-18:30
 - 廊下（空調）：使用なし
 - 特別教室：使用なし
 - ・断熱：外壁はウレタンフォーム吹付 GL 工法、窓は一重窓（日射遮蔽なし）
 - ・照明：全て LED

比較検討したシナリオは以下の5つである。

- ① 現状：一重窓、断熱対策なしの状態を再現した。
- ② カーテンによる日射遮蔽：室温が $28^{\circ}C$ を超えた際にカーテンを使用し、日射を遮蔽。
- ③ 窓の複層ガラス化：窓を断熱・遮熱性能の高い Low-E 複層ガラス（空気層 6mm、熱貫流率（U 値）2.46）に変更。
- ④ 外壁・床・屋根断熱：外壁・床・屋根に高性能な断熱材を追加。
- ⑤ 全ての対策を実施：上記②，③，④の対策を全て同時に実施。

〈4・2〉 シミュレーションの結果と考察 各シナリオにおける年間床面積あたりエネルギー消費量のシミュレーション結果を下表に示す。

シミュレーション結果では、単独の対策としては「③窓

表 6 エネルギーシミュレーションによる年間エネルギー消費量の比較

シナリオ	年間エネルギー消費量 (MJ/m^2)	削減率 (現状比)
① 現状	744.93	基準値
② カーテンによる日射遮蔽	730.92	1.9%
③ 窓の複層ガラス化	689.66	7.4%
④ 外壁・床・屋根断熱	745.85	-0.1%
⑤ 全ての対策を実施	695.72	6.6%

の複層ガラス化」が 7.4%と最も高いエネルギー削減効果となった。これは、窓の複層ガラス化は、夏の日射熱侵入を防ぎ、冬の熱流出を防ぐため、冷暖房双方の負荷削減に貢献するためであろう。「②カーテンによる日射遮蔽」は 1.9%の削減となり、簡易計算の結果よりは限定的であったが、低コストで導入可能な対策としての有効性は確認できた。

一方で、「④外壁・床・屋根断熱」のシナリオでは、エネルギー消費量が微増した。これは、断熱強化によって冬の暖房エネルギーは削減されたものの、夏場には PC や照明、人体から発生する熱が室内にこもり、冷房が必要となる日数が増加した可能性がある。

この傾向は「⑤全ての対策を実施」した場合にも見られ、断熱強化の負の効果が窓の複層ガラス化の正の効果を一部相殺し、削減率が「③窓の複層ガラス化」単独の場合を下回った。

この原因としては、3つの対策が組み合わさることで、断熱による夏の熱ごもりが、単独の場合よりもさらに強く作用し、複層ガラス化やカーテンの効果を一部相殺してしまうことが考えられる。

この結果は、複数の省エネ対策を組み合わせても、必ずしも効果が最大化するとは限らず、その相互作用を慎重に考慮する必要があることを示している。

5. 最後に

〈5・1〉 結 論 本研究の結果、アンジー館は他棟に比べ夏期のエネルギー使用量が顕著に多く、その要因として日射負荷の大きさが予測された。また葆光館の例から、建物の新しさだけでは効率は決まらないことも示された。

冷房負荷計算では、教室では遮光用カーテンの導入により平均 16.5%、高断熱複層ガラスの導入により 18%の削減できるという結果が得られた。短期的に見れば簡単に付けられる遮光用カーテン、長期的に見ればより削減効果の高い複層ガラスに優位性があると考えられた。

さらにシミュレーションでは、窓の複層ガラス化により、建物全体で年間エネルギー消費量を 7.4%、カーテンによる日射遮蔽により 1.9%削減できる一方、外壁や屋根の断熱強化では消費量が微増する結果になった。全ての対策を実施した場合の削減率が窓の複層ガラス化単独の場合を下回ったことから、複数の対策を組み合わせても、必ずしも効果が最大化するわけではないことが分かった。

以上から、アンジー館における今後の省エネ対策としては、窓の複層ガラス化が、学習環境を快適に保ちながら、無理なく省エネを実現できる最も有効な手段であるといえる。

〈5・2〉 展 望 　　今後は、全ての対策を実施した場合の削減率が単独の対策を行った場合を下回った要因を分析し、複数の対策の相互作用を明らかにしたい。

また本研究は熱負荷を抑える対策に対象を限ったが、太陽光発電等のエネルギー創出による省エネ対策についても、比較検証したい。

さらに、建物単位で得られた知見を活用し、学校全体や

同規模の教育施設への適用可能性を検証することが今後の課題である。

文 献

- ・神戸女学院中学部・高等学部：「交通アクセス」<https://www.kobejogakuin-h.ed.jp/info/koutsu.html>（2025/8/19 閲覧）
- ・資源エネルギー庁：「標準発熱量・炭素排出係数（総合エネルギー統計）」（2025/3/14）https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/carbon_2023.html（2025/6/15 閲覧）
- ・空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧：基礎編，pp.396-403（2010）