

正会員 ○李明香* 同 ○近本智行**
同 末光真大*** 同 甲坂朋也****

放射冷却シート 日射反射 高放射率
省エネルギー 温度緩和 CFD

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて、近年、建築物のCO₂排出量の削減が求められており、省エネルギー基準の適合義務化やZEB（Net Zero Energy Building）が推進されている。特に、建築物の断熱性能の向上により冷暖房負荷の削減を目指しているが、これにより暖房負荷は削減される一方で日射による取得熱が要因により冷房負荷は増大するケースも見られる^{※1)}。そこで、建築物への日射受熱量を減らすことができれば冷房負荷の削減も見込めるものと考えられる。既往研究^{※2)}においては、日射反射率 90%の遮熱シートを屋根面に敷設することで冷房負荷が削減されることを明らかにしている。

そこで本研究では、更なる冷房負荷削減のために、日射反射率 95%、放射率 95%の特性を有する放射冷却シート^{※3)}に着目した。放射冷却シートによる冷房負荷の削減効果を検証するために、まず、事務所建築の屋根面に放射冷却シートの敷設有無による冷房負荷を定常計算によりそれぞれ算出する。この計算結果の妥当性に関しては、DECC データ^{※3)}より得た冷房負荷と比較し、一般的な事務所の屋根面に放射冷却シートを敷設した際の冷房負荷削減量を明らかにする。

一方、本研究で採用している放射冷却シートの用途としては、膜状建築にも可能性が広がる。事例として、大阪の万博のパヴィリオンにおいて本素材が採用されている。既往研究^{※4)}における、室内環境の性能検証を目的として、放射冷却シートと普通テントの実測を行っており、放射冷却シートは普通テントと比べて表面およびテント内温度が低温になることを明らかにしている。そこで本研究では、それぞれの膜の特性に応じた定量的な熱性能の検証を目的として CFD 解析を行う。本報では解析に必要な入力条件を実測値から整理し、解析条件の妥当性について解析値と実測値を比較して確認していく。

DECC データの電力消費量(kWh/m²・月)の項目を地域ごとに平均し、月別の電力負荷平均を算出

COP=3 に統一して推定月別冷房負荷を算出
冷房負荷 = 全電力量 - 空調消費電力
= 全電力量 - 冷房負荷 ÷ COP
= 全電力量 × COP / (COP + 1)

図 1 DECC データによる冷房負荷原単位の計算手順

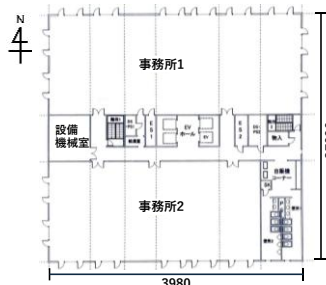


図 2 事務所モデル

表 2 計算条件

	青森市	仙台市	鳥取市	東京都	大阪市	鹿児島市
外気温 [°C]	23.5	24.4	27.1	26.9	29.0	30.2
全天日射量[W/m ²]	715.7	718.5	726.5	737.7	740.2	727.3
壁熱貫流率[W/m ²]	0.99					
ガラス貫流率[W/m ²]	2.64	2.64	4.12	4.12	4.12	4.12

表 1 シートとテント膜の物性値

	放射冷却シート	普通テント
シート厚み[mm]	0.53	0.4
比熱 [J/kg・K]	1260	1370
熱伝導率[W/m・K]	0.14	0.10
熱貫流率[W/m ² ・K]	6.3	6.3
反射率 [-]	0.95	0.75
放射率 [-]	0.92	0.92

2. 事務所建築における冷房負荷削減量の計算

2.1 DECC データによる冷房負荷計算

DECC データ^{※3)}より事務所建築における冷房負荷原単位を算出し、計算で求める冷房負荷のオーダーを確認する。DECC データより 7 階建ての事務所、面積区分 2,000m²～30,000m²のデータを抽出し、地域区分 3～7 の 8 月の冷房負荷を算出する。計算手順を図 1 に示す。冷房負荷原単位は、DECC データの電力消費量の項目を地域ごとに平均し、月別の電力負荷平均を算出した。その後、COP=3 として、月別の推定冷房負荷を算出した。

2 シート敷設建物の冷房負荷の定常計算

図 2 に、計算に使用した建築モデルを示す。省エネルギー基準の 10,000m²の事務所モデル^{※6)}を使用し、屋根面に放射冷却シートを敷設する場合と、しない場合の熱負荷原単位を計算する。表 1 に計算に使用した放射冷却シートと普通テントの物性値、表 2 に計算地域と気象条件、建物性能を示す。冷房負荷原単位は以下の式により求めた。

$$Q = Q_{tin} + Q_{sin} + (Q_{light} + Q_{human} + Q_{app}) \quad (1)$$

$$Q_{tin} = \frac{Q_{wall,t} + Q_{wind,t} - (Q_{wall,n} + Q_{wind,n})}{A} \quad (2)$$

$$Q_{sin} = \frac{Q_{wall,s} + Q_{wind,s}}{A} \quad (3)$$

ここで、 Q ：冷房負荷原単位[Wh/m²・月]、 A ：床面積[m²]、 Q_{tin} 、 Q_{sin} ：温度差、日射による熱取得の月積算値

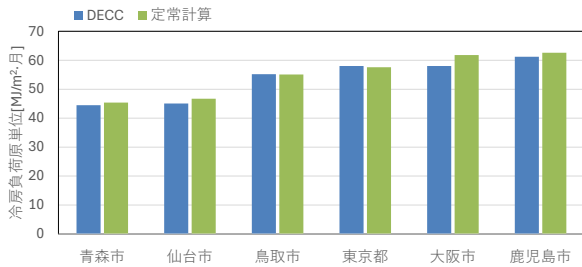


図3 DECC、定常計算による冷房負荷原単位

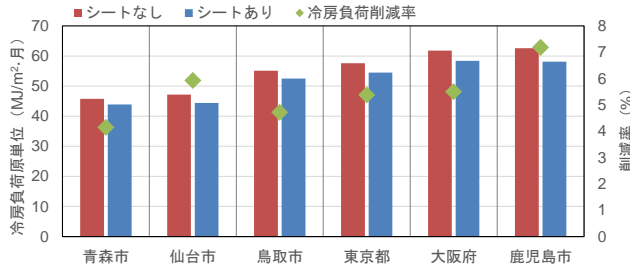
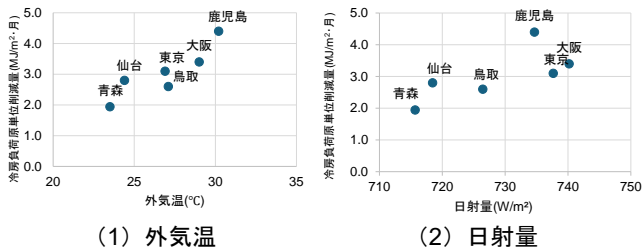


図4 放射冷却シート有無による冷房負荷原単位



(1) 外気温 (2) 日射量
図5 シート敷設時の冷房負荷原単位の削減量と気象条件の相関

[Wh/m²・月]、 Q_{light} 、 Q_{human} 、 Q_{app} ：照明・在室者・機器発熱の月積算値[Wh/m²・月]、 $Q_{wall,t}$ 、 $Q_{wind,t}$ ：外壁、窓の温度差等による定常貫流熱取得 [Wh/月]、 $Q_{wall,n}$ 、 $Q_{wind,n}$ ：外壁、窓の長波長放射による定常貫流熱損失 [Wh/月]、 $Q_{wall,s}$ 、 $Q_{wind,s}$ ：外壁、窓の日射による定常貫流熱取得 [Wh/月]である。各壁面方位を考慮した日射受熱量については、8月15日の太陽高度、太陽方位角として算出した。また、室温は26℃とした。これらの式により計算した一般事務所建築における定常計算の結果とDECCデータより求めた冷房負荷原単位を図3に示す。本計算による冷房負荷原単位はDECCデータより算出した結果と概ね同程度となった。

2.3 放射冷却シートの熱負荷削減量

2.2の計算手法を用いて、放射冷却シート有無の冷房負荷原単位と削減量を図4に示す。放射冷却シートを敷設することにより4.8%～7.5%の冷房負荷が削減された。図5に、シート敷設時の冷房負荷原単位の削減量と各地域の気象条件（外気温と日射量）の相関を示す。冷房負荷は、外気温が高く日射量が多い地域ほど削減量が大きくなる傾向にあることがわかった。

3. CFD解析による温熱環境の検証

3.1 既往研究^{文4)}におけるテントの測定結果

写真1に既往研究において実測したテントの外観写真、図6にテント内の熱画像、図7にテント内の上下温度分布

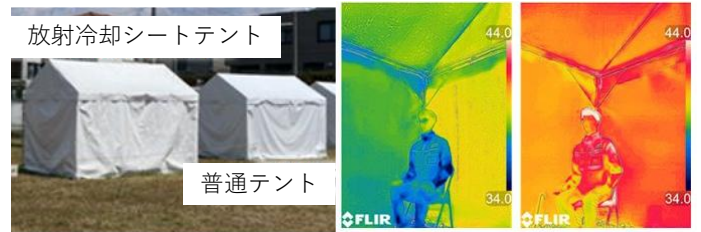


写真1 実測テントの外観 (1)放射冷却シート (2)普通テント
図6 テント内表面の熱画像

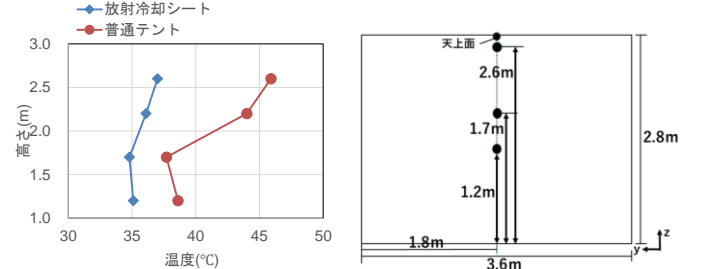
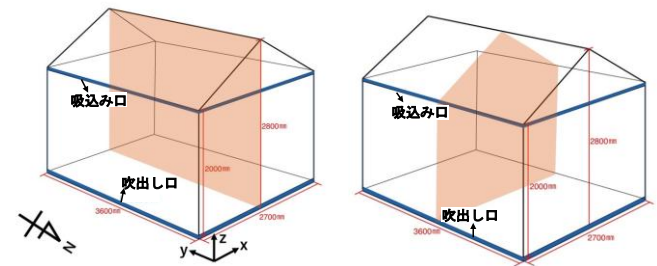


図7 テント内の上下温度分布 図8 実測地点(中央断面図)



(1) x軸断面中央 (2) y軸断面中央
図9 CFD解析モデル

表3 解析条件

解析コード	STREAM(ver.2023)	
乱流モデル	標準 k-ε モデル	
境界条件	流入境界	流速：0.2m/s
	流出境界	自然流出
	壁面境界	温度境界 or 熱流境界
メッシュ分割数	①	約50万メッシュ:84×61×88
	②	約100万メッシュ:112×75×11
	③	約200万メッシュ:214×150×220
外気条件(実測値)	気温[℃]	30.9
	相対湿度[%]	60.1
	日射量[W/m²]	1000

(GL+1.2, 1.7, 2.2, 2.6m 地点)の実測値を示す。普通テントに比べて放射冷却シートはテントの表面温度が低く、空間内の上下温度分布もいずれの地点においても低温となっている。特に、天井付近において、普通テントは45℃以上と高温になるのに対して、放射冷却シートでは37℃程度であり、8.9℃温度が低くなった。本実験の測定結果とCFDの解析結果を比較して、テント内熱環境の検証を行った。

3.2 解析概要および境界条件

図9に、CFDにおけるテントモデルを示す。空間内の温度の比較は、実測において測定したテント中央の高さ

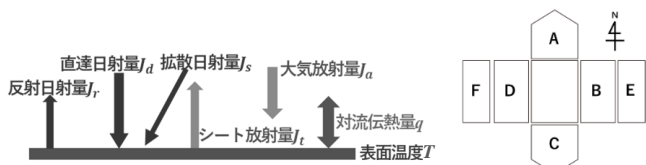


図 10 シート表面の熱収支

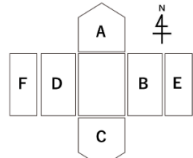


図 11 テント展開図
壁面表記名

表 4 壁面境界条件

		北 A	東 B	南 C	西 D	EF
放射冷却シート	表面温度[°C]	30.2	30.2	32.0	31.9	37.0
	流入熱量[W]	-206.6	-185.9	-127.2	-118.9	76.6
普通テント膜	表面温度[°C]	32.9	32.9	36.3	36.1	45.9
	流入熱量[W]	-217.8	-196.0	-62.9	-65.2	291.9

1.2m、1.7m、2.6m、天井表面の 4 点である（図 8 参照）。比較する 2 種類のシートの物性値は表 1 に示している。テント内の気流を再現するため、地表面付近の下部の 4 方向を吹き出し口、地表面より 2m 高さの位置を吸い込み口として、それぞれ 3cm の流入口、排出口を想定した。換気回数が 10 回/h となるように流入速度は 0.2m/s と仮定し、排出は自然流出として設定した。解析モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルである。計算地点は大阪市此花区（緯度:135.45、経度:34.68）、計算日時は 2023 年 7 月 4 日 12:45 とし、その際に測定した気象条件から壁面境界条件を計算して作成した。壁面境界条件は温度境界条件および熱流境界条件とし、各壁面の境界条件は測定した気象データを用いて図 10 および以下の熱収支式により算出した。

$$J_d + J_s + J_a = J_r + J_t + q \quad (4)$$

$$J_r = \rho(J_d + J_s) \quad (5)$$

$$J_a = \sigma T_o^4 (0.562 + 0.076\sqrt{f}) \quad (6)$$

$$J_t = \epsilon \sigma T_w^4 \quad (7)$$

$$q = \alpha_c (T_w - T_o) \quad (8)$$

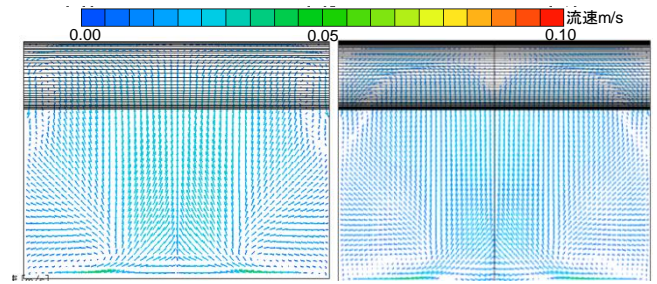
ここで、 ρ : 日射反射率[-]、 T_o : 外気温の絶対温度[K]、 σ : シュテファン-ボルツマン定数[$(=5.67 \times 10^{-8}) \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$]、 f : 空気の水蒸気圧分圧[mmHg]、 ϵ : シート放射率[-]、 T_w : シート表面温度[K]、 α_c : 対流熱伝達率[$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]である。シートの放射率は 0.95、日射吸収率は天井面の測定温度より天井面の熱収支式を用いて推定し、テント膜: 0.45、放射冷却シート: 0.23 に設定した。各面の入射日射量は測定された水平面全天日射量より直散分離により直達成分と拡散成分に分けて考慮した。熱流境界条件については、表面温度より各面の流入熱量 q_{in} は以下の式により算出した。

$$q_{in} = K (T_w - T_i) \quad (9)$$

ここで、 K : シートの熱貫流率[$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]、 T_i : テント内温度[K]である。

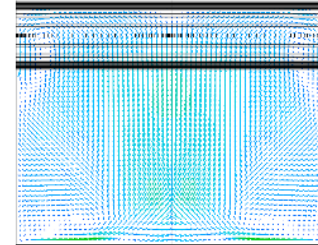
図 11 にテント展開図と各面の表記名、表 4 に算出した各壁面の境界条件を示す。床面は測定値がないため測定した 1.2m の空気温度を固定温度と仮定して与えた。

メッシュ依存性を検証するために、メッシュ分割を約



(1) 50 万メッシュ

(2) 100 万メッシュ



(3) 200 万メッシュ

図 12 メッシュ分割数の検討

表 5 CFD 解析ケース

	シート種類	境界条件	放射考慮
Case1-1	放射冷却シート	表面温度	放射考慮なし
Case1-2	普通テント膜		
Case2-1	放射冷却シート	流入熱量	放射考慮あり
Case2-2	普通テント膜		
Case3-1	放射冷却シート	流入熱量	放射考慮あり
Case3-2	普通テント膜		

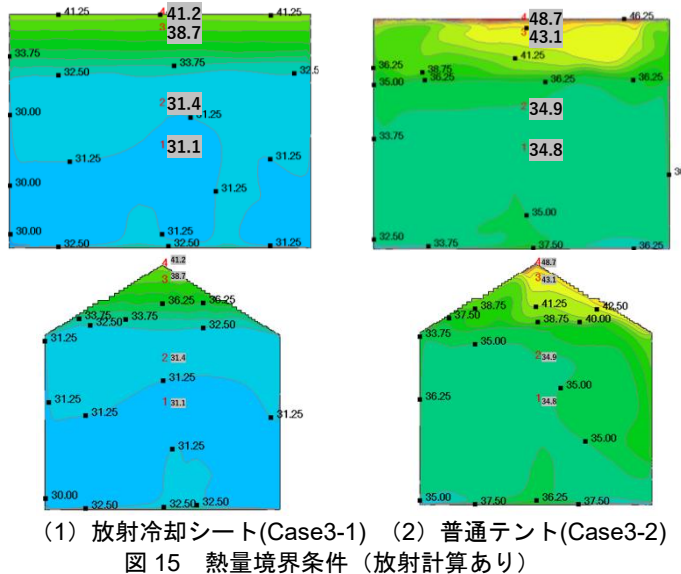
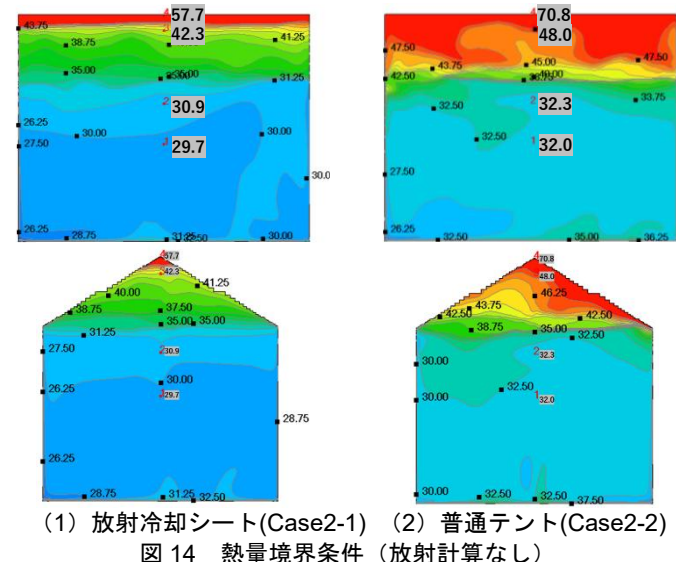
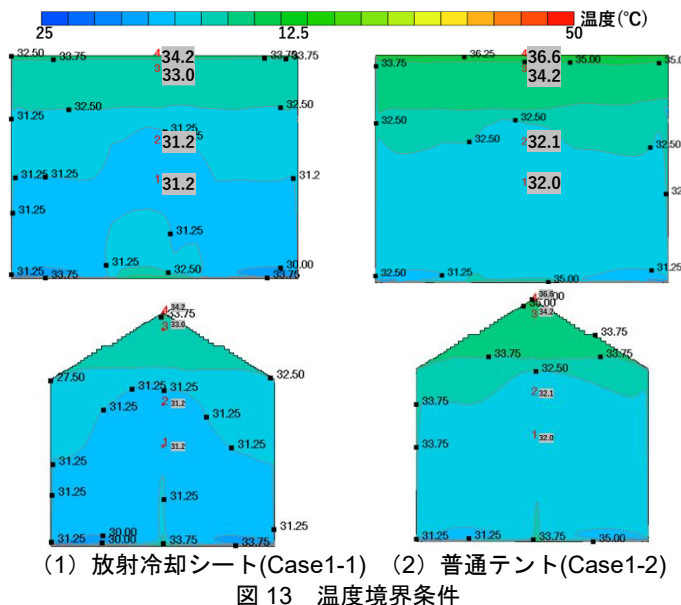
50 万メッシュ、約 100 万メッシュ、約 200 万メッシュの 3 パターンで計算した。図 12 に x 軸中央断面における流速の計算結果を示す。50 万メッシュと 100 万メッシュで比較すると 100 万メッシュでより対流が再現されていることがわかった。100 万メッシュと 200 万メッシュとの比較では大きな変化は見られなかった。したがって、メッシュ数は 100 万メッシュとした。

3.3 解析ケース

表 5 に解析ケースを示す。壁面の境界条件は、流入熱量あるいは外側の表面温度を与えた条件とし、放射冷却シートと普通テント膜についてそれぞれ計算した。流入熱量を与えた条件においては放射考慮の有無についても検討した。

3.4 CFD 解析結果

図 13~15 に x 軸および y 軸の中央断面の CFD の温度分布の解析結果を示す。また、表 6、7 に、放射冷却シートと普通テント膜の実測値と解析値をまとめたものを示す。温度境界条件とした Case1-1 と Case1-2 は各壁面に与える温度が低くなり、温度分布も同様に低温となった。流入熱量を入力（放射計算なし）した Case2-1 と Case2-2 では天井付近に熱だまりが発生しており、放射冷却シートで 57.7°C、普通テントでは 70.8°C まで上昇した。流入熱量を境界条件とし、放射計算を考慮した Case3-1 と Case3-2 では、各面からの放射熱により壁面の温度が均一化され、天井面でも実測値と同程度の値となった。一方、1.2m と 1.7m 地点では 4°C ほどの温度のずれが生じた。これは、



地表面温度などの入力条件の情報が不足したことや、テント内の気流が実際の状況と異なる可能性があることに起因すると考えられる。

表 6 放射冷却シート解析値

温度[°C]	1.2m	1.7m	2.6m	天井
実測値	35.1	34.8	36.1	37.0
Case1-1	31.2	31.2	33.0	34.2
Case2-1	29.7	30.9	42.3	57.7
Case3-1	31.1	31.4	38.7	41.2

表 7 普通テント膜解析値

温度[°C]	1.2m	1.7m	2.6m	天井
実測値	38.6	37.7	44.0	45.9
Case1-2	32.0	32.1	34.2	36.6
Case2-2	32.0	32.3	48.0	70.8
Case3-2	34.8	34.9	43.1	48.7

4. まとめ

本研究は、放射冷却シートを用いた事務所ビルの冷房負荷低減効果について検証した。また、本シートを膜状に利用した際の熱環境を再現するために CFD 解析により実測値と空間上下温度分布を比較した。得られた知見を以下に列記する。

- 1) 一般的な事務所建築の屋根面に放射冷却シートを敷設することで 4~7%の冷房負荷削減効果が見込まれた。
- 2) 放射冷却シートは日射による受熱を低減するため、日射量が多く高温な地域ほど削減効果がある。
- 3) 膜状テント内の温熱環境を CFD 解析し、測定値を用いた精度検証を行った結果、熱量境界条件において放射を考慮した条件で比較的良好な精度が確認された。
- 4) 境界条件として不足するデータは計算式により算出し、解析結果を実測値と比較することで、凡その境界条件を確認することができた。
- 5) テント下部の実測値とのずれはテント内の気流が現実と異なる可能性や境界条件の不足によるものと考えられる。

今後、これらの知見を用いて万博における膜状パヴィリオンの解析を行い、放射冷却シートの熱環境およびエネルギー性能についても検証を行う予定である。

謝辞

本研究の解析においては、小林美穂氏（当時、立命館大学）に多大なご尽力をいただいた。記して謝意を示す。

注釈

注1) 一般的な素材は、放射冷却出熱<熱輻射入熱であるが、放射冷却シートは熱を大気的光透過率が高い波長帯 8-13μmの熱輻射に変換し放熱する特徴を持ち、放射冷却出熱>熱輻射の入熱となる。

参考文献

- 文1) 尾崎明仁ら：民生家庭部門エネルギー消費量の将来予測 秦野市を事例とした省エネルギーのシナリオ、日本建築学会環境系論文集、第 79 巻 第 700 号、pp.489-497、2014
- 文2) 山中俊夫ら：日射遮蔽シートを敷設した金属製折板屋根の遮熱性能予測：日本建築学会大会学術講演梗概集、2013、pp.261-268
- 文3) DECC 非住居建築物の環境関連データベース：一般社団法人日本サステナブル建築協会、(2024/11/12 閲覧)
- 文4) 大杉亮輔ら：直射日光下で周囲より低温となる放射冷却防水シートの開発と建築物適用による省エネ性の検証と応用：日本建築学会大会学術講演集、pp.1305-1306、2024
- 文5) 長井達夫ら：建物用途別負荷原単位及び未利用エネルギーデータの整備、空調調和・衛生工学会学術研究発表会論文集、第 239 号、pp.27-35、2017
- 文6) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説

*立命館大学 准教授・博士 (学術)
 **立命館大学 教授・博士 (工学)
 ***SPACECOOL 株式会社 博士 (工学)
 ****SPACECOOL 株式会社

* Associate prof., Ritsumeikan University, Ph.D
 ** Prof., Ritsumeikan University, Dr.Eng.
 *** SPACECOOL INC., Dr.Eng.
 **** SPACECOOL INC.