TED Plaza

直射日光下で周辺気温より低温となる受動的放射冷却素材の原理とその応用

末光　真大

大阪ガス株式会社
SPACECOOL 株式会社
m-suemitsu@osakagas.co.jp

１．　はじめに

地球温暖化の緩和，人権の尊重，IoE(Internet of Everything)社会の実現に向け，暑熱対策の重要性が高まっている．地球温暖化の緩和の観点では，暑熱地域に位置する新興国の所得水準の向上により，世界の空調機器は 2050 年に 2018 年比で約 3 倍に増加し日米欧の現在の発電能力総計と同等のエネルギー需要が新たに生じることが予測（International Energy Agency, 2022）されていることから，空調エネルギー削減の重要性が増している．人権の尊重の観点では，多様な労働者が熱中症にならず安全・快適に働ける環境の整備が SDGs の考えの浸透によりこれまで以上に求められている（Xiaoting, 2019）．IoE 社会の実現の観点では，インターネットにつながるデバイス数が急激に増加（情報通信白書令和 3 年版, 2021）する中，デバイスの信頼性の向上によるメンテナンス頻度の低減が今後求められることが予想される．デバイスの信頼性や寿命はデバイス温度を下げることにより向上させられるため，暑熱対策は重要である．

このように，暑熱問題への対応の重要性が増す中，解決の一助として近年注目されている技術が，直射日光下で周囲より受動的に温度低下する「放射冷却素材」である．当素材は，熱を大気の光透過率が高い波長帯 8-13 μm (大気の窓)の熱輻射に変換し宇宙空間に放出する所謂「放射冷却現象」を活用しており，2014 年のスタンフォード大学のグループの報告を皮切りに米国を中心に盛んに報告されている（Raman, et al., 2014, Zhai, et al., 2017, Yuan, et al., 2018, Li, et al., 2019）．放射冷却現象は，空気中の水蒸気量が少なく，標高が高いほど大きくなる．これら 2 つの条件が整うと大気の窓の波長帯が広がるとともに大気の透過率が高まり，宇宙空間に熱を放出し易くなる．大阪ガスでは 2017 年より放射冷却素材の開発に取り組んできた．当時の先行研究は，乾燥時期（Raman, et al., 2014, Li, et al., 2019）や砂漠地域（Zhai, et al., 2017, Yuan, et al., 2018, Li, et al., 2019）(空気中の水蒸気量の推定量: 2-5 g/m^3)，標高~600 m の台地（Yuan, et al., 2018, Li, et al., 2019）といった放射冷却現象を得るうえで有利な条件での実証が殆どであった．また、秋~冬の太陽光強度が弱い時期に試験された例が多く（Raman, et al., 2014, Zhai, et al., 2017, Yuan, et al., 2018, Li, et al., 2019），太陽光由来の入熱が小さい点で日中周囲より低温となりやすかった．以上のように，先行研究の試験条件は日中周囲より温度低下しやすいものであり，日本の夏季や東南アジア地域のような高温多湿環境における効果は当社の調べでは 2017 年時点で確認されなかった．

本論文では，日中周囲より低温となる放射冷却素材の冷却原理について説明するとともに，本素材を設計・作製し，日本の海抜 0 m 地帯の夏の直射日光の下で性能を発揮させることに成功した結果について述べる．併せて，放射冷却素材を様々な用途に適用した際の効果を実証試験の結果を交え解説する．最後に，この素材の可能性について議論する．

２． 放射冷却素材の冷却原理

放射冷却素材が直射日光下で外気より低温となる原理を解説する．天気予報などで耳にする放射冷却現象は，物体の熱が熱輻射（赤外線）の形で-270 ℃と低温の宇宙空間に移動し，周囲より冷える現象のことであり，夜間車などに霜が張る原因としてよく知られている．しかし，一般的な素材の場合，太陽光が照射されると，放射冷却による放熱よりも太陽光エネルギーや温められた大気の熱輻射からの入熱の方が大きくなるため日中の冷却は困難である．

当社が開発した「放射冷却素材」は，太陽光および大気の熱輻射に由来する入熱よりも素材からの放射冷却による宇宙空間への放熱を大きくすることにより日中の冷却を可能にした素材である．この特性を得るために素材に要求される輻射率スペクトルについて解説する．Fig. 1 に太陽光スペクトル(AM1.5G) と大気の透過率スペクトルの一部(太陽光スペクトルと重なると図が煩雑になるため 4 μm より長波長部分のみ)に併せ，放射冷却素材の理想的な輻射率スペクトルとを並べて表記する．大気の透過率が高い 8-13 μm の波長帯は一般に「大気の窓」と呼ばれる．地表から出た熱輻射のうち，大気の窓の波長帯の熱輻射は大気に吸収されずに-270 ℃と極低温の宇宙空間に放出される．熱を宇宙空間に放出するためには，この大気の窓の波長帯の輻射率を 100%に近づけることが望ましい．一方、日中の冷却を実現するためには，太陽光由来の入熱を抑制することを目的に太陽光スペクトルが分布する波長帯(0.3-4 μm)の光はできる限り吸収せず反射する必要がある．キルヒホッフの法則において熱平衡状態における輻射率と吸収率が等しいことから，太陽光スペクトルが分布する波長帯の輻射率を 0%に近くし，反射率を 100%に近づけた材料設計が望ましい．大気は透過率が低い波長帯において大きな熱輻射を発するために，大気からの熱輻射由来の入熱を抑える観点で大気の透過率が低い波長帯(6~8 μm, 13 μm より長波)において材料の輻射率(=吸収率)を低減させることが望ましい．なお，守秘の観点から材料の具体的な設計や構造をここで公表できないことを了承頂きたい．

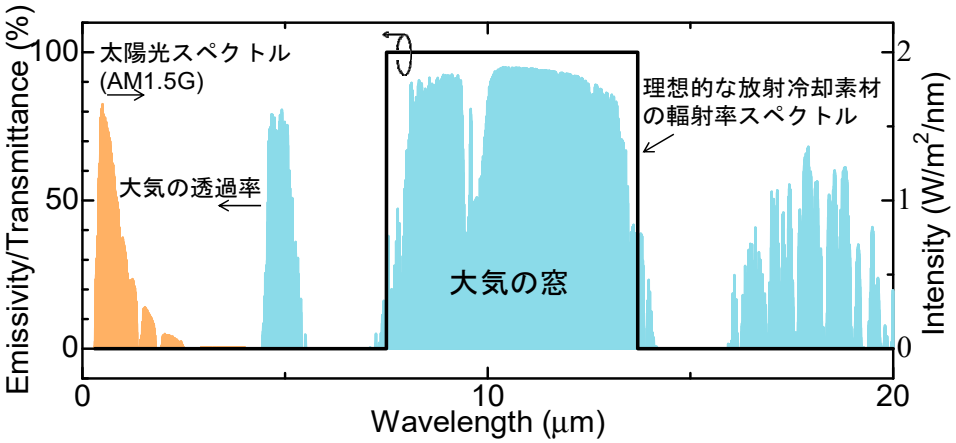

Fig. 1 Ideal emissivity spectrum of radiative sky cooling material (solid line), sunlight spectrum (AM1.5G, orange), part of atmospheric transmittance spectrum (only wavelengths longer than 4 μm are shown, light blue). The atmospheric transmittance spectrum is the value at an altitude of 4000 m under clear sky.

３． 放射冷却素材の性能

本節では当社で開発した SPACECOOL®の性能を紹介する．測定は，Fig. 2A のように大阪市此花区の 2 階建ての建屋の屋上にて実施した．測定系を Fig. 2B に示す．測定系は太陽光が測定系そのものに与える熱影響を最小化する観点で，白板ガラスにて構成した．サンプルはガラス製の支柱で支持し，天井の空いた白板ガラス製の容器に入れ，風による対流伝熱の影響を排除するためにポリエチレン製のフィルムで天井面を覆い測定を行った．なお，ポリエチレンは大気の窓の赤外線を透過する性質を有しており，放射冷却現象を阻害しない．温度はサンプルの地面側に熱容量の小さい薄膜測温抵抗体を貼付け取得した．

2017 年 9 月 1 日から 3 日間に渡って実施した試験結果を Fig. 2C に示す．当試験では放射冷却素材，ステンレス(SUS)板，日射反射塗料(建物外壁温度を下げる目的の塗料)を塗布した SUS 板の比較を行っている．放射冷却素材は SiO_2 と B_2O_3 をあわせた無機材料の放射層と Ag と Al を組み合わせた太陽光反射層を組み合わせた設計であり，太陽光反射率>95%，大気の窓における熱放射率>95%という値を実現している．3 日間の太陽光強度は Fig. 2C の橙色で示すように，南中時に

1000 W/m^2 程度であり，天気はいずれも晴れであった．また，空気中の水蒸気量は日中に~13 g/m^3，夜間に~15 g/m^3 であった．サンプルの裏面温度を同図に示す．日中の周囲気温（水色線）は 32-35 ℃程度であったのに対し，SUS の温度（灰色線）は日中最大 80 ℃近くに上昇した．日射反射塗料の温度（青線）は日中最大で 45 ℃近くに上昇した．これら結果に対し，放射冷却材料（赤線）は 3 日間を通して外気温よりも常に 2-5 ℃低温であり，日射反射塗料と比較して南中時刻前後の温度が 10～15 ℃低温となることがわかった．湿度が低い地域や標高の高い地域で同様の試験を行うと Fig. 2C よりも大きな冷却効果が得られることが予想される．

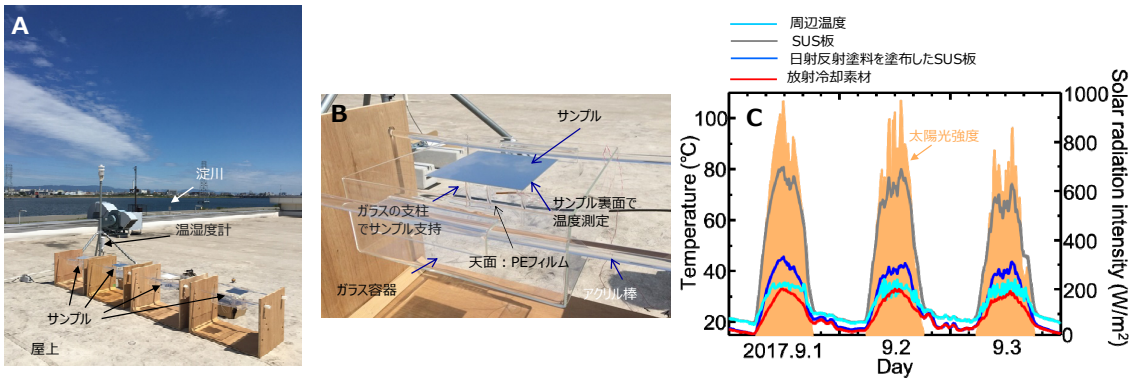

Fig. 2　Evaluation of radiative sky cooling materials. A) Appearance of measurement. B) Details of the measurement system. C) Demonstration results.

Fig. 3 に当社で開発したシート状の柔軟性の高い放射冷却素材 SPACECOOL®の外観写真を示す．Fig. 2C に示した試験結果は無機材料系の柔軟性のない放射冷却素材の温度であるが，フィルム状の放射冷却素材も太陽光反射率>95%，大気の窓における熱放射率>95%という値を有しており，無機材料系の素材と同様の放射冷却特性を示す．シート状の素材は樹脂材料の光学多層構造により構成されている．ラインナップとしては，Fig. 3A に示した粘着剤付きのフィルム形状および Fig. 3B に示した帆布形態（テント生地）の 2 種類があり，貼り付ける，縫製する，熱ラミネートするなどして任意の対象物に放射冷却性能を与えられる．

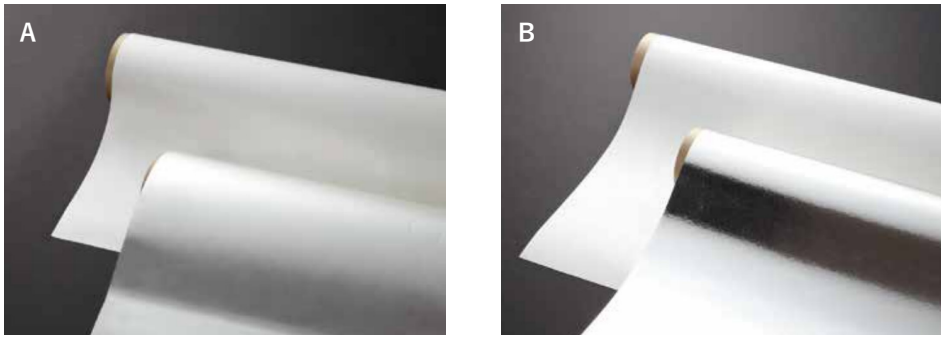

Fig. 3　Appearances of sheet-like radiative sky cooling material SPACECOOL® developed by Osaka Gas. A) Radiation sky cooling films with adhesive. Two types, matte silver and white. B) Radiation sky cooling canvasses.

4．実証試験

大阪ガス株式会社は，公益社団法人 2025 年日本国際博覧会協会と大阪商工会議所が実施する「夢洲における実証実験」に採択（大阪ガスプレス，2021）され，8 月 26 日から夢洲万博会場予定地などで，放射冷却素材 SPACECOOL®による省エネ性や快適性などを評価する実証実験を開始した．本節では，この実証試験の結果及び関連するこの枠組み以外の試験結果を紹介する．

4・1　放射冷却素材の性能が活かせる適用先

放射冷却素材の性能が活かせる適用先としては，1) 高性能な断熱材が使われていない用途（或いは断熱材が使えない用途），2) 内部の熱源を冷やす用途が挙げられる．1)について，高性能な断熱材を使用する場合，放射冷却素材の熱情報が遮断され空間内部に伝わらないため，放射冷却素材の効果を遮断しない観点で断熱材の使用量が少ない構成が望まれる．2)について，遮熱や断熱で熱源の冷却ができないのみならず，熱籠りの原因となる．本稿では，1)の例としてトラックコンテナおよびテントでの実証試験を 2)の例として分電盤を用いた実証試験の結果を紹介する．

4・2　トラックコンテナを用いた実証試験

Fig. 4 に SPACECOOL®をトラックコンテナに適用した際の効果を示す．本試験は大阪市此花区の大阪ガスエネルギー技術研究所にて実施した. Fig. 4A に示す 2t 車用アルミドライバンを 2 台用意し，1 台に SPACECOOL®(マット調のシルバー色)を施工し，もう一台は未施工とした．なお，アルミドライバンはアルミのシルバーが露出しており，SPACECOOL®施工しても外観上の大きな変化はない．晴天時のサーモグラフィ画像を Fig. 4B に示す．施工済みのコンテナ外壁の温度が未施工と比較し大きく下ることがわかる．2020 年 9 月 12 日から 13 日にかけての天井温度を Fig. 5C に示す．未施工の天井温度は最大約 70 ℃近くと火傷するレベルであるのに対し，施工済みの天井温度は最大 30 ℃程度であり，天井温度が最大約 40 ℃低下することがわかる．同じ期間のコンテナ中央温度を Fig. 4D に示す．中央温度は約 10 ℃低下することがわかる．物流の温度信頼性の向上，ドライバーの労働環境の改善に繋がる．また，冷凍・冷蔵車両に適用した場合は省エネによる燃費向上につながる．

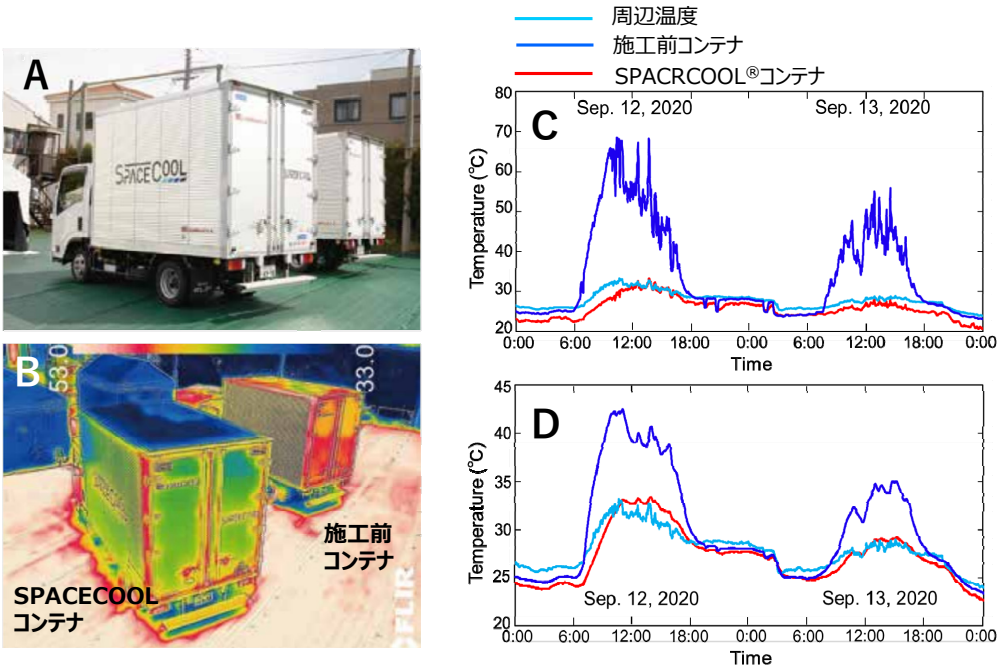

Fig. 4　The demonstration test of the truck container. A) Visible camera image. B) Thermographic image. C) Ceiling temperatures from 12th to 13th September 2020. D) Room temperatures in the center of the container during the same period.

4・3　テントを用いた実証試験

Fig. 5 に SPACECOOL®をテントに適用した際の効果を示す．本試験はカンボウプラス株式会社殿と共同で大阪市此花区の大阪ガスエネルギー技術研究所にて実施した. Fig. 5A のように, 縫製, 熱溶着によって帆布状の SPACECOOL®を横幕付テントに加工した．市販の一般帆布で作製したテント（普通テントと表記），市販の遮熱帆布で作製したテントを 2 種類（A 社遮熱テント、B 社遮熱テントと表記）も同様に加工し，性能比較を行った．なお，A 社遮熱テントの素材は透光性の素材であり，B 社遮熱テントの素材は遮光性の素材である．2021 年 8 月 27 日の 14 時に撮影した内部のサーモグラフィ画像を Fig. 5A に示す. すべて 35 ℃から 50 ℃の温度グラデーション表記と

なっているが，SPACECOOL®テントの膜温度が最も低下することがわかる．放射冷却現象は視野中の天空の比率が小さいと生じにくく，SPACECOOL®で作製した壁面は直射日光下で外気より温度上昇しやすい．2021 年 8 月 31 日から 9 月 1 日にかけての天井温度を Fig. 5B に示す．天井温度をテント内で測定していることから側壁の熱影響を受け外気より温度低下しなかったものの，SPACECOOL テントは普通テント比で日中最大約 10 ℃低下することがわかった．同期間のテント内部の体感温度を Fig. 5C に示す．なお，体感温度はグローブ温度計の温度としている．体感温度は普通テント比較で最大 10 ℃程度，A 社遮熱テント比較で最大 8 ℃，B 社遮熱テント比較で最大 4 ℃低下することが分かった．このテントにエアコンを装着し，24 ℃設定で冷房をかけた際の空調負荷の検証を別途行った．その結果，9 月 7 日～9 月 19 日の 9 時から 18 時において，SPACECOOL テントの消費電力が普通テントおよび A 社遮熱テント比較で 30-60%削減, 遮光タイプの B 社遮熱テント比較で 20-40%削減されることがわかった．

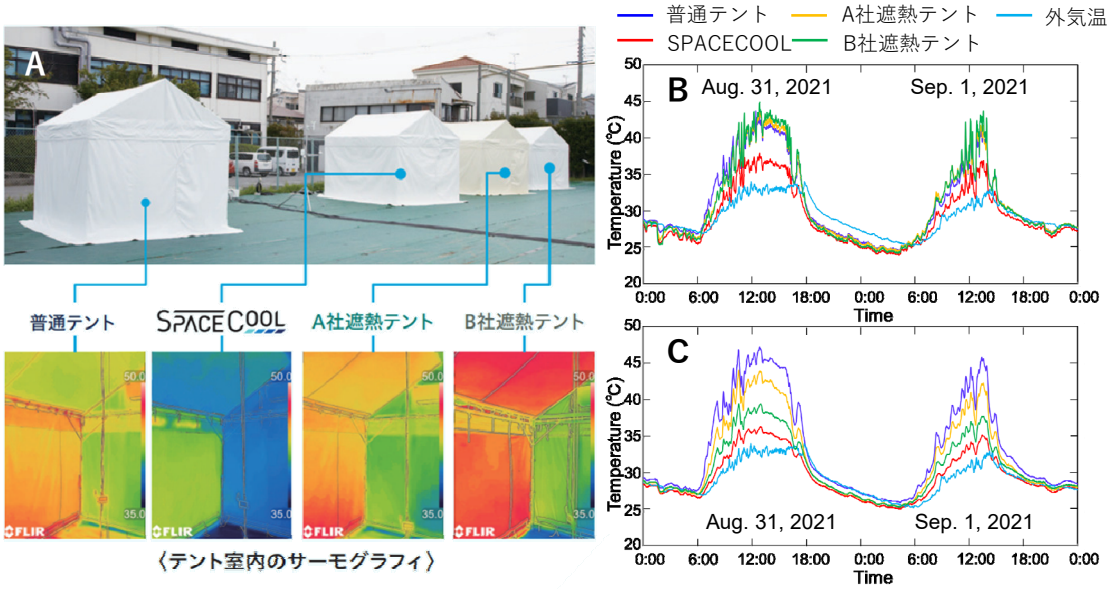

Fig. 5　Test using tents. A) Appearance taken from the south side. From the left, the normal tent, the SPACECOOL tent, the heat shielding tent from company A, and the heat shielding tent from company B. B) Tent ceiling temperature from 31th August to 1st September 2021. C) Tent glove temperature during the same period.

4・4　分電盤を用いた実証試験

Fig. 6 に SPACECOOL®を分電盤に適用した際の効果を示す．本試験は株式会社竹中工務店殿，セイリツ工業株式会社殿と共同で大阪市此花区の大阪ガスエネルギー技術研究所にて実施した．従来分電盤，遮熱塗料を塗工した分電盤（遮熱塗料分電盤），遮光板付分電盤と SPACECOOL®を施工した分電盤の内部温度を比較評価した．Fig. 6A に外観写真を示す．西日および朝日由来の入熱を最大化する観点で，分電盤の長辺が東西に向くよう配置した．全 10 台の分電盤の内，写真奥（北側）5 台にはインバータを模して 200 W のヒーターが盤内部に搭載されており，手前（南側）5 台はヒーターが搭載されていない．Fig. 6B にサーモグラフィ画像を示す．西側から順に SPACECOOL®施工分電盤（2 台），従来分電盤，遮熱塗料施工分電盤，遮光板付分電盤の順に並んでいる．なお，遮光板付分電盤は分電盤に日陰を作る目的で遮光板を備えた盤であり，一般に最も熱対策が施された分電盤として知られ，踏切等信頼性が要求される分野に使われる．サーモグラフィより SPACECOOL®分電盤の筐体温度が最も低下することがわかる．2021 年 9 月 21 日のヒーターが搭載されていない分電盤の内部温度を Fig. 5C に示す．SPACECOOL®施工分電盤の内部温度は従来分電盤より最大約 10 ℃低下し，遮光板付分電盤との比較で最大約 5 ℃低下した．SPACECOOL®施工分電盤の内部温度が日中外気より少し高温となった理由は，4.3 項での説明の通り外気より低温となりやすい天井面積より天空率が低く外気より高温となりやすい壁面積が大きいことに由来する．Fig. 6D にヒーター搭載分電盤のヒーターから 15 cm 離れた箇所の内部温度（インバーターの環境温度に相当）を示す．熱源が内部にある場合，従来分電盤，遮熱塗料塗布分電盤，遮光板付分電盤の温度に大差が生じない一方，SPACECOOL®を施工した分電盤の内部温

度のみが約 8 ℃温度それぞれの盤より低下することがわかった．併せて，遮光板付分電盤は遮光板と分電盤の筐体の間で熱籠りが生じることで，この条件で夜間温度が最も高くなることが分かった．

インバータや蓄電池、パワーコンディショナーは一般に環境温度が高いと劣化速度が早まる．例えば様々な機器に部品として入っているコンデンサーは温度が 10 ℃上がると劣化速度が 2 倍早くなることがアレニウス則より知られている(10 ℃2 倍則)（竹井勝仁, 2010）．以上の通り，分電盤内部の温度低下は屋外機器の信頼性の向上，屋外据付蓄電池の活用期間の延長につながる．

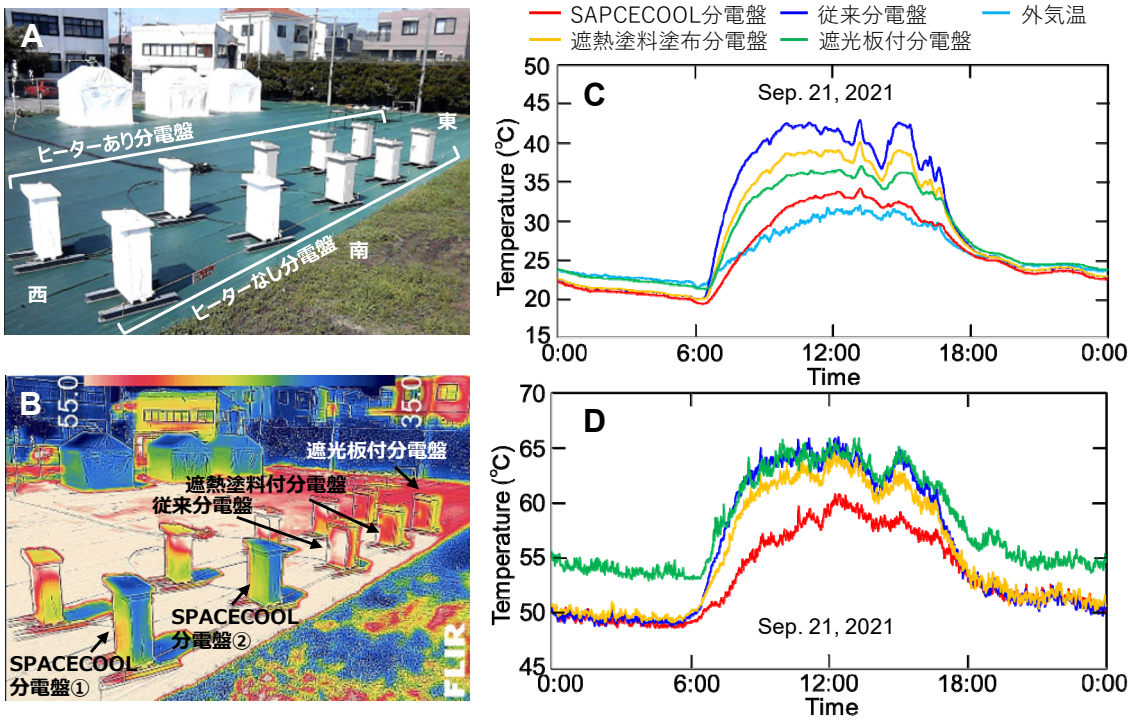

Fig. 6 Measurement results of the internal temperature of the distribution board. A) An appearance taken from the south side. From left to right: a SPACECOOL® distribution board (1), a SPACECOOL® distribution board (2), a conventional distribution board, a heat shield paint distribution board, and a distribution board with light shielding plate. B) A thermographic image taken from the south side. C) Temperatures inside distribution board without heating elements on 21st September 2021. D) Internal temperatures of distribution board with heating element on 21st September 2021.

5． 今後の展望

以上のように，直射日光下で周囲より受動的に温度低下する放射冷却素材 SPACECOOL®は地球温暖化の緩和，人権の尊重，IoE 社会の実現の一助として Fig. 7 に示す様々な用途で活用されることが期待される．大阪ガスではベンチャーキャピタルの WiL と共同で放射冷却素材の製造・販売を手掛けるスタートアップ企業「SPACECOOL 株式会社」を 2021 年 4 月に設立し，共同で社会実装活動を行っている．

5・1 地球温暖化の緩和への貢献

例えば，万博のようなイベント会場や倉庫には設営の容易さから膜建造物が多用される．膜建造物は日射の影響で内部の温度が上がりやすいため，特に春・夏・秋に冷房需要がある．放射冷却素材を活用により冷房負荷の大幅な低減が期待される．これに併せ，倉庫，データセンター，工事現場事務所，冷蔵・冷凍トラックの燃費改善など様々な分野の冷房エネルギーの低減に寄与することが期待される．

5・2　人権の尊重

少子高齢化に伴い，建築現場や運送業の人手不足が社会問題となっている．放射冷却素材は暑熱環境を緩和し，熱中症リスクを低減させられる．このことは多様な人材が安全に働ける労働環境の提供に寄与する．併せて，災害現場における仮設住宅，医務室，更衣室や休憩室としての活用が期待される．また，内部を省エネルギーに冷却できる特性は，限られたエネルギーの有効活用が求められる災害時に於いて大きな価値がある．

Fig. 7　Application of radiative sky cooling material SPACECOOL®.

世界の食糧問題の解決の一助となる可能性もある．世界の食料のおよそ 3 分の 1 が廃棄されており，特に低所得国に於いては冷蔵・冷凍が脆弱なフードサプライチェーンの早期或いは途中段階で腐敗により捨てられ，それが飢えに繋がっている(消費者庁消費者政策課，食品ロス削減関係参考資料，2018)．電力グリッドへの接続なしで周囲より温度低下する放射冷却素材は，特に低所得国の食料腐敗率を低減させ，SDGs で掲げられている「飢餓をゼロに」の達成の一助となる可能性がある．

5・3　IoE 社会の実現

IoE 社会の実現に向け，IoT デバイス数は急速に増加しており，2023 年には 2016 年の約 2 売の約 341 億個を超すと言われる（情報通信白書令和 3 年版，2021）．数の増加に伴い，これらデバイスの故障確立を下げる（信頼性を向上させる）ことはシステムを維持するうえで重要である．放射冷却素材を用いると屋外機器の温度を下げられ，4.4 項で記載の理由で信性が向上するのでメンテナンスコストを下げられる可能性がある．

5・4　その他応用

SPACECOOL®は，太陽光発電を利用するうえで重要な蓄電池の保護にも有効である．蓄電池は一般に熱に弱く，高温状態が容量低下に繋がる．併せて電気自動車への応用も期待される．ガソリンのエネルギー密度は約 12,000 Wh/kg であるのに対し，リチウムイオン電池のエネルギー密度は約 100 Wh/kg 程度とガソリンの約 1/100 である．二次電池の限られたエネルギーを有効利用するためにも，走行以外に使われる空調エネルギーを極限まで小さくすることが求められている．放射冷却素材は冷房にかかるエネルギーを小さくできるので，暑熱地域や夏場に於いて航続距離を伸ばせられると考えられる．

6．結言

大阪ガスでは，放射冷却素材 SPACECOOL®を開発し，日本の高温多湿環境の直射日光下で周囲より低温となることを初めて実証した．そのうえで，当素材のユーザー価値を「夢洲における実証実験」の枠組みを活用するなどして評価した．この実証試験を通してトラックコンテナやテン

トといった高性能な断熱材が使われていない用途，屋外分電盤といった内部に熱源が存在する用途において大きな効果が得られることを実証した．SPACECOOL®の特徴を活かすことで地球温暖化の緩和，人権の尊重，IoE 社会の実現に繋がる様々な用途に今後活用されることが期待される．

我々は今後も本素材の性能の向上を目指した研究開発活動や普及活動を行い，持続可能な社会づくりに貢献していきたいと考えている．

謝辞

本研究を進めるにあたり，公益社団法人 2025 年日本国際博覧会協会と大阪商工会議所には「夢洲における実証実験」に於いて多大なご支援を賜りました．併せて，「夢洲における実証実験」に於いては NTN 株式会社殿，カンボウプラス株式会社殿，セイリツ工業株式会社殿，株式会社竹中工務店殿には協力企業として多大なご助言を賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．

文献

International Energy Agency, https://www.iea.org/newsroom/news/2018/may/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-dema.html. (accessed March 28, 2022).

Li, T., Zhai, Y., He, S., Gan, W., Wei, Z., Heidarinejad, M., Dalgo, D., Mi, R., Zhao, X., Song, J., Dai, J., Chen, C., Aili, A., Vellore, A., Martini, A., Yang, R., Srebric, J., Yin, X., Hu, L., A radiative cooling structural material, Science, Vol. 364 (2019), pp. 760-763.

大阪ガスプレス, https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/1297180_46443.html.

Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E., Fan, S., Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight, Nature, Vol. 515 (2014), pp.540–544.

消費者庁消費者政策課，食品ロス削減関係参考資料，平成 30 年 6 月 21 日版.

総務省，情報通信白書令和 3 年版.

竹井勝仁，重要性が増してきた二次電池技術の最前線，電気学会誌, Vol. 5(130) (2010), pp. 280-284.

Xiaoting. X.，慶応義塾大学大学院経営管理研究科修士論文, 2019 年経営学　第 3564 号.

Yuan, H., Yang, C., Zhen, X., Mu, W., Wang, Z., Yuan, W., Zhang, Y., Chen, C., Liu, X., Shen, W., Effective, angle-independent radiative cooler based on one-dimensional photonic crystal, Opt. Express, Vol. 26 (2018), pp. 27885-27893.

Zhai, Y., Ma, Y., David, S. N., Zhao, D., Lou, R., Tan, G., Yang, R., Yin, X., Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling, Science, Vol. 355 (2017), pp. 1062-1066.