

放射冷却素材を用いて過冷却度を増大させた蒸気圧縮冷凍サイクルの検討 II

Enhancement of sub-cooling of vapor compression refrigeration cycle by using radiative sky cooling materials II

○大杉亮輔^{1,2†}, 若林努¹, 甲坂朋也², 杉本雅行¹, 末光真大^{1,2‡}
大阪ガス¹, SPACECOOL²

Osaka Gas, SPACECOOL, ○R. Osugi^{1,2†}, T. Wakabayashi¹, T. Kosaka², M. Sugimoto¹, M. Suemitsu^{1,2‡}
E-mail: †r-oosugi@osakagas.co.jp, ‡m-suemitsu@osakagas.co.jp

【序】放射冷却現象によって直射日光下においても夜間同様、周囲より受動的に温度低下する素材(放射冷却素材)は、脱炭素社会実現の一助として期待されており、近年研究が盛んに行われている^[1-4]。我々はこれまで放射冷却素材を実現^[2]するとともに、放射冷却パネルを用いた蒸気圧縮冷凍サイクルの冷媒過冷却度の向上による冷却効率(COP_c)の改善について理論検討を行ってきた^[4]。蒸気圧縮冷凍サイクルの圧力-比エンタルピー線図を Fig. 1 に示す。本サイクルでは冷媒を蒸発器で蒸発(4→1)させた際の蒸発潜熱を冷却に利用しており、Fig. 1 赤点線のように凝縮後の冷媒温度を飽和液温度(3)より更に低温(3')に冷却する(過冷却度を増大させる)ことで COP_c を向上させられる。前回の検討では、パネルの効果を概算する目的で、大気の高透過率の 8-13 μm(大気の窓)の透過率を 100%とし、大気の窓以外の大気由来、素材由来の熱輻射を無視した計算を行った。今回、全波長における大気および素材の熱輻射を考慮した熱収支計算を行い、パネル温度(T_{SC})について実測との整合をとり、併せて COP_c の計算も行ったので報告する。

【モデル・計算方法】T_{SC}を式(1)を用い計算し、そのうえで COP_c を導出した。

$$Q_{\text{Rad}}(T_{\text{SC}}) = Q_{\text{Sun}} + Q_{\text{Air}} + Q_{\text{Con}}(T_{\text{SC}}, T_{\text{Water}}) \quad (1)$$

ここで、 $Q_{\text{Rad}}(T_{\text{SC}})$ は温度T_{SC}のパネルの熱輻射エネルギー、 Q_{Sun} はパネルが吸収した太陽光エネルギー、 Q_{Air} はパネルが吸収した大気の熱輻射エネルギー、 $Q_{\text{Con}}(T_{\text{SC}})$ はパネル-空気間およびパネル-パネル内流水(流水温度: T_{Water})間の対流熱伝達エネルギーである。放射冷却パネル表面の光学特性は、室温域における全波長平均輻射率が 93.7%、太陽光反射率は 95%とした。モデル全体において熱損失及び圧損はないものとし、熱交換器における冷媒と水との温度差を 1°Cと設定した。Fig. 1 の(4)における冷媒の蒸発温度を 5°C、圧縮機効率を 75%とした。COP_c は $(h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$ で計算できる。 h_1, h_2, h_3 および h_4 は冷媒の各状態での温度、圧力から計算した。

【結果】外気温 35°C、日射強度 0.8 kW/m²、パネル上の空気の流れを 1 m/s とし、横軸をパネル面積として 100 m²までT_{SC}と COP_c を計算した結果を Fig. 2 に示した。大気の窓の透過率を 100%とし、大気の窓以外の波長の透過率を 0% (吸収率 100%)とした場合(Pattern A)のT_{SC}を青色実線で示す。前回の報告(Pattern Pre.)と大気の透過率スペクトルは同一であるが、大気由来の熱輻射が素材に吸収される考慮するとT_{SC}のパネル面積 100 m²時の温度(到達温度)が Pattern Pre.の黒色実線から 1.1°C上昇し 25.9°Cとなった。一方、全波長における素材由来の熱輻射を考慮することでパネル面積が 60 m²までの温度低下が Pattern Pre.より Pattern Aの方が大きくなった。大気の透過率として夏の大阪を想定したものをを用いた場合(Pattern B)のT_{SC}を赤色実線で示す。T_{SC}の到達温度が 28.9°Cとなり、我々の実測^[2]と概ね一致した。Pattern A, B, Pre.の COP_c をそれぞれ青色、赤色、黒色の破線で示す。大阪を想定した Pattern Bは過冷却によってパネル面積 100 m²の COP_c が 4.50 となるのがわかり、大阪においても放射冷却による過冷却効果が得られることが分かった。日射反射塗料などほかの素材との比較も併せ、詳細は当日報告する。

【文献】[1] A.P. Raman, *et al.*, *Nature* **515**, 540 (2014). [2] 末光 *et al.*, 秋応物, 21a-E208-11 (2019). [3] E.A. Goldstein, *et al.*, 17th IRACC, 2293 (2018). [4] 大杉 *et al.*, 秋応物, 22p-A101-1(2022).

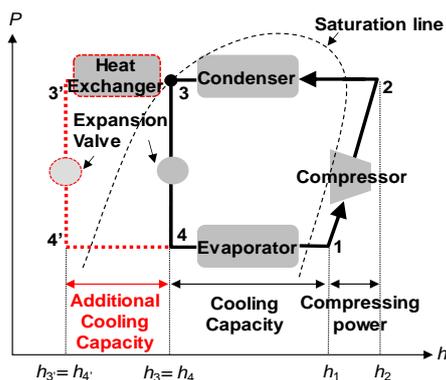


Fig. 1 Pressure-enthalpy chart of a vapor compression refrigeration cycle.

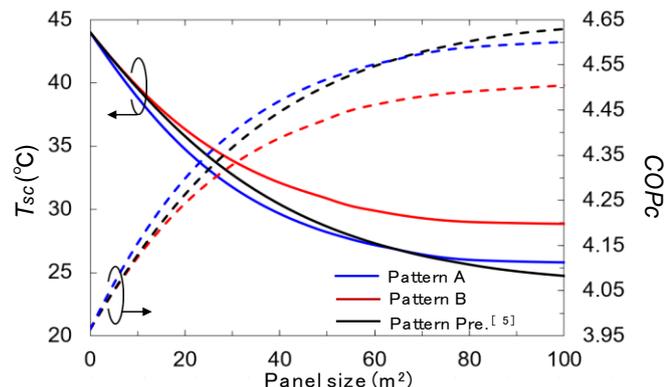


Fig. 2 Relations of panel size and T_{sc}, COP_c in each conditions.