U.D.C 699.86

プレハブ冷蔵庫の庫外側壁表面結露抑制に関する基礎的検討
—庫外空間の上下温度分布の比較—

山口　仁士*　長島　豊**　土屋　昌夫**　増田　強志**　井田　喬明**
岡島　悠紀**　立野　岡誠***　加藤　晃敏****　富田　健司*

要　約：　本研究では，プレハブ式の冷蔵庫の庫外の壁表面で発生する結露に対して，冷蔵庫の庫外空間の環境計測を実施し，結露発生状況を観察し，結露が発生する環境とその状況を特定することにより，最適な断熱厚みや建築的な納まり，庫外側壁表面の結露抑制方法を提案することを目的とする。本報では条件を変えて庫外空間の上下温度分布を計測し，その結果から特徴を把握する。結果は，断熱性能が低い冷蔵庫では背後空間の温度が下がり，特に背後空間下部の温度が低くなる。冷蔵庫内温度は低いほど背後空間の温度が下がる。背後空間の距離を 100 mm 程度とすると，設置環境温度が上昇しても背後空間下部温度は上昇しにくいことを確認した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　冷蔵庫，結露，庫外，プレハブ，温湿度環境計測

目　次：

1. はじめに
2. 冷蔵庫の概要と測定環境
3. 環境測定結果
4. おわりに

1. はじめに

建屋内に築造されるプレハブ式の冷蔵庫では，梅雨から夏期において庫外側の壁表面で結露発生の可能性が高い。その理由は，外壁から侵入する水蒸気によって露点温度が高い冷蔵庫外空間に，冷蔵庫内からの冷熱により冷却された冷蔵庫の壁が存在するためである。また，冷熱により庫外空間の空気温度が下がることも影響する。対策として断熱パネルを厚くし断熱性能を増すことも考えられるがイニシャルコストが課題となる。また，建築的に外部からの水蒸気侵入を減少させるため外壁面の隙間を減らす対策もされるが，ダクトからの空気漏洩，内外壁からの透湿など様々な状況において水蒸気が侵入する。そのため結露抑制には機械設備による対策も併せて検討する必要がある。

本研究では，プレハブ式の冷蔵庫まわりの環境計測から結露発生状況を観察し，結露が発生する環境とその時点の状況を特定することにより，最適な断熱厚さや建築的な納まりの他に，機械設備を用いた庫外側壁表面の結露抑制方法に関する提案を目的としている。

本報では基礎的検討として，条件を変えて計測した庫外空間の上下温度分布について分析し，結露抑制に必要となる条件を示す。

2. 冷蔵庫の概要と測定環境

2.1　測定対象の冷蔵庫の概要

計測対象としたプレハブ式冷蔵庫を図 1 に示す。なお本装置は－20℃以下の冷凍の温度帯まで設定可能であるが，本報では「冷蔵庫」と称す。計測用として 2023 年 5 月に神奈川県相模原市にある実験用建物内の一部に築造した。

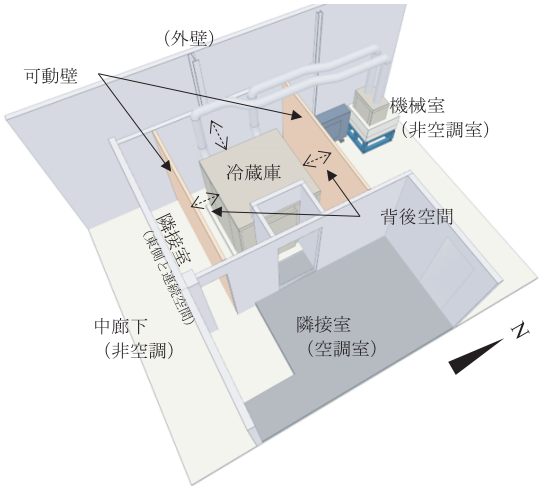


図 1　冷蔵庫設置概要図

表 1　冷蔵庫の仕様

室容積	5.8m³ （内寸：W1.8m D1.8m H1.8m）		
庫内温度	-25℃，-20℃（-25℃～15℃まで設定可能）		
ﾊﾟﾈﾙ仕様※1	44mm	77mm	100mm※3
背後空間	100～500mm まで可動		755mm
隣接居室・空間※2	居室（南面）	機械室（北面）	屋外（西面）

※1　断熱パネルは，両面が 0.4mm のカラー鋼板，硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ注入発泡。入口は防熱開き扉 t100mm，天井，入口側の断熱パネルは t100mm。
※2　天井内は高さ 600mm の空間があり，各背後空間と連続する
※3　背後空間の調整が不可のため本報では比較対象から除いた

断熱パネルの厚みや，庫外空間の距離に応じた結露危険性の検討が可能な装置である。

表 1 に冷蔵庫の仕様を示す。冷蔵庫は室面積 3.24 m²，

＊技術研究所　建築基盤技術研究部　温熱環境・風グループ　＊＊建築事業本部　設備統括部　設備設計部
＊＊＊建築事業本部　設備統括部　設備部　設備技術 G　＊＊＊＊建築事業本部　技術統括部　建築技術部　仕上環境 G

天井高さ 1.8 m，構築する壁パネルは南面 44 mm，西面 100 mm，北面 77 mm，それ以外 100 mm の断熱パネルで構築される。また，冷蔵庫の南側は空調された居室（以降，隣接室と称す），北側は機械室，西側は屋外に面する。また庫外の断熱パネルに対面する壁を可動壁として，その空間の距離を 100 mm～500 mm まで調整可能な仕様とした。なお，各断熱パネル面と対面する壁までの庫外空間を背後空間と称する。

2.2 測定概要

図 2 に測定位置を示す。奥行き方向の位置は冷蔵庫の各壁面の中央である。主な測定内容は，冷蔵庫の庫外表面の温度，背後空間の温度および温湿度，結露発生状況を確認するための画像である。測定内容と測定間隔等を表 2 に示す。

測定期間は 2023/6/3～2024/6/30 であり，期間内で条件を変更し計測した。計測期間中変更した条件は①庫内温度，②背後空間の距離である。各条件の測定日を表 3 に示す。なお，条件ごとの比較をするため，冷蔵庫が設置されている環境である機械室の気温（以降，設置環境と称す）の変化が類似している日を抽出し代表日（表 3 中の括弧書き）とした。

3. 環境測定結果

3.1 結露発生時の熱湿気環境

画像から結露を確認した日時を特定し，結露発生時の外気温湿度，空気温湿度，壁表面温度等をもとに結露が発生する環境を検討した。本節では画像の中から最も結露水量が多かった 8/23（8/22 18：00～）を代表日として，断熱パネル 44 mm の中央位置（床から 1,135 mm の位置）における測定結果を示す。なお庫内温度は－25℃，背後空間の距離は 100 mm である。

図 3 に結露発生状況の画像を示す。結露の状況は 44 mm の断熱パネル全体に発生し，特に断熱パネルのかん合部に水滴となった結露を確認した。結露発生時の温湿度環境の推移を図 4 に示す。図 4（a）に示す冷蔵庫外の表面温度は 8/22 20：00～16：00 まで露点温度を下回り，計測値からも結露の発生が明らかであった。そこで，この結露が発生する環境がどのような状況であったかを明らかにしていく。

図 4（a）に断熱パネル表面温度と外気，機械室，隣接室の空気温度を示した。断熱パネル表面温度の推移に対して，隣接室の空気温度の推移の傾向が類似した。断熱パネルが面する空間であったことから，隣接室から可働壁を介して熱が伝わったと考えられる。

図 4（b）に断熱パネル 44 mm 側の背後空間，外気，機械室，隣接室の絶対湿度を示した。背後空間の絶対湿度の推移に対して，機械室の絶対湿度の推移の傾向が類似した。冷蔵庫の設置環境としては機械室内に設置されているため，水蒸気は機械室から流入していたと考えられる。以上から，断熱パネル表面温度は断熱パネルと対面する壁に接する空間の空気温度に影響を受け，水蒸気は冷蔵庫が設置される環境の影響を受けることがわかった。なお，断熱パネル 77 mm 側においても同様の傾向であることを測定結果から確認している。

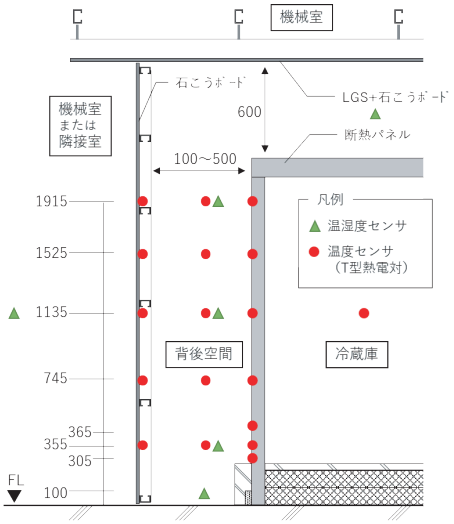


図 2　計測位置

表 2　各壁・空間の主要な測定内容

測定項目	測定位置	測定間隔	機器
温湿度	・背後空間 FL100,355,1135,1915mm ・天井内，機械室，隣接居室，屋外 各 1 点	10 min	おんどとり RTR507B
表面温度	・庫内壁　FL355,1135,1915mm ・庫外壁　FL305,355,455,745,1135,1525,1915mm ・稼働壁表面　FL355,745,1135,1525,1915mm ・稼働壁裏面　FL355,1135,1915mm	10 min	T 型熱電対
空気温度	・背後空間 FL355,745,1135,1525,1915mm ・庫内中央 1 点	10 min	T 型熱電対
画像	・庫外壁 44mm 側,77mm 側	1 hour	ﾃﾞｼﾞﾀﾙｶﾒﾗ

※外壁面の屋外側表面温度の計測点は無い
※冷蔵庫外壁の表面(FL355,1135,1915mm)では熱流束 HF-50，10min 周期で計測

表 3　測定概要

測定期間		2023/6/3～2024/6/30※3		
測定条件	①庫内温度※1	-20℃	6/30～7/7	(7/1) ※4
		-25℃	7/7～7/14	(7/9)
	②背後空間の距離※2	500mm	6/2～6/23	(6/17)
		300mm	6/23～6/30	(6/27)
		100mm	6/30～7/7	(7/1)
	③断熱厚み	44mm	全期間	(8/23)
		77mmm		

※1 背後空間は 100mm　※2 庫内温度は-20℃　※3 条件設定時以外は庫内温度-25℃　※4 括弧内は代表日

3.2 背後空間の上下温度分布

前節では 44 mm 断熱パネル中央部の結果を示したが，上下方向に距離のある空間では，上下に温度成層が形成さ

れる。特に冷熱は下部の温度が低く，上部の温度が高い傾向がある。そのため結露危険性を評価する際は冷蔵庫壁の下部での結露に注意することが多い。本節では，背後空間の計測結果から，背後空間の上下温度分布の特徴について検討する。なお水蒸気量の上下方向の分布は無いことを測定結果から確認している。

3.2.1　断熱パネル厚みによる検討

図 5 に断熱パネル 44 mm と 77 mm の背後空間の上下温度分布を示す。計測結果は前節と同じ 8/23（庫内温度－25℃，背後空間の距離 100 mm）の計測値である。各プロットは 3 時間の平均値（0：00～2：50 を 3：00 のプロットしている。以降，他データも同様）である。外乱は図 4 の外気温度に示したように 8/23 8：00 ごろから外気温度が上昇した。

断熱パネル 44 mm と 77 mm の背後空間の上下温度分布は，共に計測位置が低いほど空気温度が低く，位置が高くなるに従い空気温度が高くなる傾向であった。

それぞれを比較すると，44 mm 側の空気温度は 77 mm 側の空気温度に比べて各時刻の上下温度は低い。なお，前節にて断熱パネル表面温度は近接する空間の空気温度の影響を受けることを示したが，空気温度においても同様の傾向が考えられるため，隣接室および機械室の空気温度が一致する 0：00～6：00 までの計測値を用いて比較をする。例えば 3：00 の FL 100 mm の位置では 44 mm 側が 25.5℃，77 mm 側が 27.2℃ であり，44 mm 側が 1.7℃ 低い。また，FL 100 mm と FL 1,915 mm との温度差（以降，上下温度分布の勾配と称す）を比較すると，例えば 3：00 では 44 mm 側が 2.2℃，77 mm 側が 1.2℃ となり 44 mm 側の上下温度勾配が大きい。

各断熱パネルが接する空間の空気温度が異なるため当該結果を絶対値で評価することは難しいが，傾向として断熱厚みが薄い場合は断熱性能が低く，背後空間に対して冷熱を伝達し空気温度を下げ，それにより背後空間下部の温度も低くなることがわった。また，上部との温度差が開き上下温度差が大きくなる結果であった。

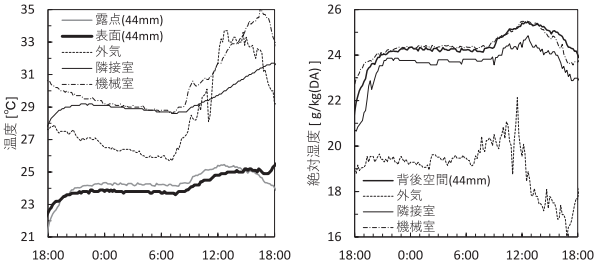
3.2.2　庫内温度による検討

庫内温度の違いによる検討にあたり代表日の設置環境温度を図 6 に示す。15：00 以降に－20℃ の設置環境温度が低く差が生じたが，そこを除くと類似した環境であった。この環境において計測した断熱パネル 44 mm 側の上下温度分布を図 7 に示す。それぞれを比較すると，－25℃ の空気温度は－20℃ の空気温度に比べて各時刻の上下温度は低い。また上下温度分布の勾配は，各時間において－20℃ に比べて－25℃ の方が大きい。庫内温度が低いほど冷熱の熱貫流量が多いため，前項の断熱性能の結果と同様の傾向であった。

3.2.3　背後空間の距離による検討

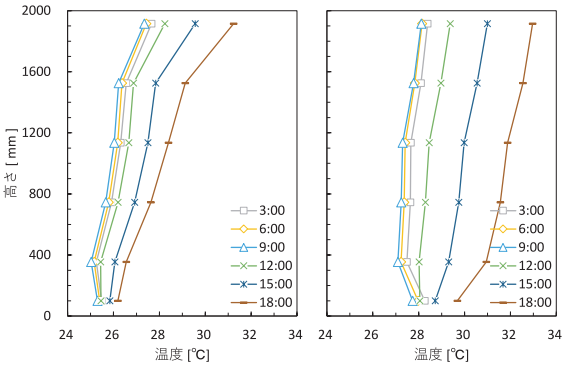
背後空間の距離の違いによる検討にあたり代表日の設置環境温度を図 8 に示す。時間により 1℃ 程度の温度差は生じるが温度推移は類似した環境であった。この環境において計測した断熱パネル 44 mm 側背後空間の上下温度分布

図 3　結露発生状況（2023/8/23）



（a）温度　（b）絶対湿度

図 4　結露発生時の環境データの推移（8/22～23）



（a）44mm 側　（b）77mm 側

図 5　断熱厚みの違いによる上下温度分布

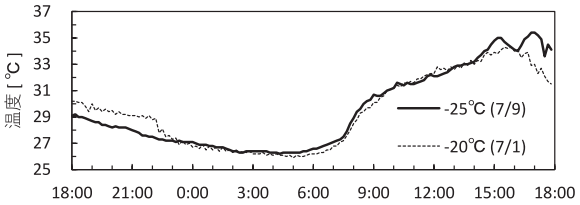
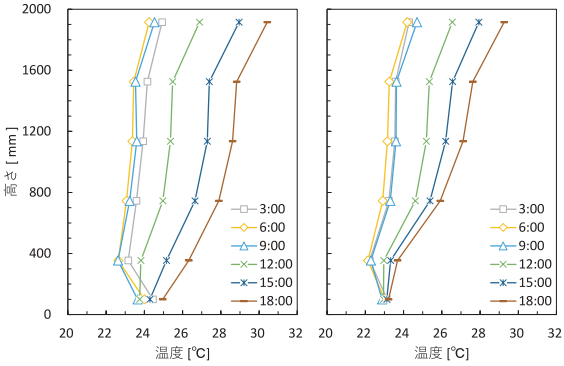


図 6　設置環境温度（7/1，7/9）



（a）庫内温度-20℃(7/1)　（b）庫内温度-25℃(7/9)

図 7　庫内温度の違いによる上下温度分布

を図 9 に示す。100 mm，300 mm，500 mm の背後空間の上下温度分布は，3：00 の時点では上下温度分布の差は大きくなく，それぞれの上下温度を比較しても類似した温度であった。設置環境の温度が上昇した後の 12：00 以降に上下温度分布が形成さる結果となった。

背後空間の距離による空気温度を比較すると FL 100 mm の空気温度に特徴があり，背後空間 100 mm では時間が経過しても空気温度の差が小さいが，背後空間 300 mm と 500 mm では時間経過とともに温度が上昇した。3：00 と 18：00 の温度差では背後空間 100 mm では 0.5℃，背後空間 300 mm では 2.4℃，背後空間 500 mm では 2.5℃であった。つまり，背後空間が狭い場合に設置環境の温度が上昇しても背後空間の下部の温度は上昇しにくく，ある程度の空間の幅を持たせることで空気温度を上昇させることができる結果となった。

4. おわりに

本報では冷蔵倉庫の断熱パネルの厚み，庫内温度，背後空間の距離を変え，背後空間の空気環境の特徴を把握し結露抑制に必要となる条件について知見を得た。

- 断熱性能の低い仕様では，背後空間の温度が下がり，特に背後空間下部の温度が低くなる。
- 冷蔵庫内温度は低いほど背後空間の温度が下がる。
- 背後空間の距離を 100 mm 程度とすると，設置環境温度が上昇しても，背後空間下部温度は上昇しにくい。

今後の展開として熱伝達率や表面温度に関する検討を進め，適切な断熱厚みや建築的な納まり，機械設備を用いた表面結露抑制方法に関する開発を進める。

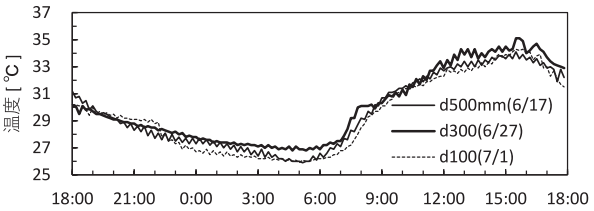
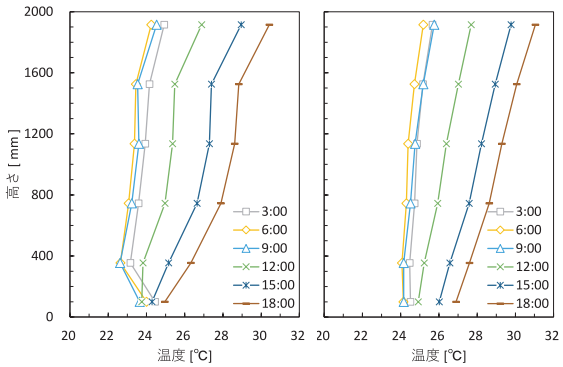
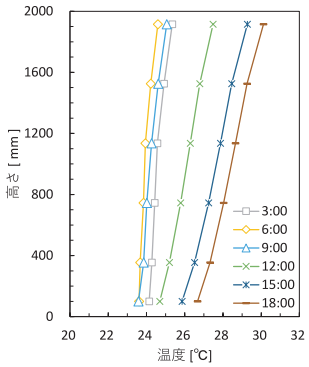


図 8　設置環境温度（6/17，6/27，7/1）



（a）100mm(7/1)　　（b）300mm(6/27)



（c）500mm(6/17)

図 9　背後空間の距離の違いによる上下温度分布

FUNDAMENTAL STUDY ON THE SUPPRESSION OF SURFACE CONDENSATION ON THE OUTER SIDE WALL OF PREFABRICATED REFRIGERATORS —COMPARISON OF VERTICAL AIR TEMPERATURE DISTRIBUTION IN OUTER SPACE—

H. Yamaguchi, Y. Nagashima, M. Tsuchiya, T. Masuda, T. Ida
Y. Okajima, M. Tachinooka, A. Kato and K. Tomita

The purpose of this study is to propose the optimal insulation thickness, architectural delivery, and method of controlling dew condensation on the outside wall surface of a prefabricated cold storage warehouse by conducting environmental measurements of the outside space of the warehouse, observing condensation generation, identifying the environment and conditions under which condensation occurs, and This paper describes a method to control condensation on the surface of the outer side wall of a storage unit under different conditions. In this paper, we measure the vertical temperature distribution in the outer space of the warehouse under different conditions, and from the results, we determine the characteristics of the warehouse. The results show that in a refrigerated warehouse with low insulation performance, the temperature in the rear space decreases, especially the temperature in the lower part of the rear space. The lower the temperature inside the freezer, the lower the temperature in the back space. It was confirmed that when the width of the back space is about 100 mm, the temperature of the lower part of the back space is less likely to rise even if the installation ambient temperature rises.