

非空調施設における床面結露予測に関する研究

黒木 洋
Hiroshi Kuroki

概 要

近年、物流施設などに代表される非空調施設において、1階のコンクリート床表面に結露が発生する現象が頻発している。本研究では、この床面結露を発生日の前日までに予測する手法の構築を行った。床面結露は、外気が高湿となる時期に、床温度が空気の露点温度を下回ることによって生じる。このため、先ず翌日の床温度を予測し、床温度予測値から外気露点温度の気象予報値を差し引いた値(ΔT)によって結露リスクを判別する方法を検討した。翌日の床温度は、過去の床温度および外気温度の実測データから相関式を作成して予測するものとした。実物件での試験結果から、床温度の予測値と実測値は高い相関を示すことが確認できた。床温度予測により得られた ΔT の日最低値が任意の閾値を下回る日を、結露リスク有りと判断するものとし、実物件において正答率の検証を行った。6カ月間の検証期間を通して、結露リスク予測の正答率は90%以上の高い値であり、本予測手法により前日までに結露リスクの予測が概ね可能であることが確認できた。

Study on Predicting Floor Condensation in Buildings without Air Conditioning

Abstract

In recent years, condensation on concrete floor surfaces of first floors has frequently occurred in non-air-conditioned buildings such as logistics centers. This study developed a method to predict floor condensation up to one day in advance. Floor condensation occurs when the floor temperature falls below the dew point temperature during periods of high outside humidity. Therefore, the following day's floor temperature was first predicted, and then examined a method to determine the condensation risk by calculating the difference (ΔT) between the predicted floor temperature and the weather forecast value of the outside air dew point temperature. The floor temperature for the following day is predicted by creating a correlation formula based on past measured data of floor temperature and outside air temperature. From the test results in actual buildings, it was confirmed that the predicted floor temperature values showed a high correlation with the measured values. A day was considered to have a condensation risk when the daily minimum value of ΔT obtained from the floor temperature prediction fell below a certain threshold, and the accuracy rate was verified in actual buildings. Based on the six-month verification test results, the accuracy rate of the condensation risk prediction was over 90%. It was confirmed that this prediction method could generally predict the risk of condensation with accuracy up to a day in advance.

キーワード：非空調施設、床面結露、予測、気象予報データ

1. はじめに

近年の気象の高湿化に伴い、物流施設などに代表される非空調施設において、1階のコンクリート床表面に結露が発生する現象（以下、床面結露）が頻発している。床面結露は夏型結露に分類され、主に梅雨時期から夏期にかけて、高湿外気の侵入に伴い地中冷熱や熱容量の影響によって低温となった床面が露点温度を下回ることによって表面に結露水が顕在化するものである^{1),2)}。床面結露は昼夜の寒暖差やシャッター開放による外気侵入によっても発生するため、断熱や換気等の対策で完全に無くすることは困難とされている³⁾。被害の拡大を抑制するには、床面結露を予測し、使用者が荷物の養生や換気扇の停止等の事前対応を取るための猶予を確保することが重要となる。

本研究では、床温度および外気露点温度の実測値と気象予報情報を用いて、床面結露が発生するリスクを発生日前日までに予測する手法の検討を行った。本報では床面結露予測手法の概要と、実物件において実施した運用試験結果を示す。

2. 床面結露予測手法の検討

2.1 機器構成

床面結露予測を行うための機器構成を図1に示す。センサーで測定した床温度および外気露点温度データを制御装置に蓄積する。制御装置はインターネットに接続し、気象情報提供企業から気象予報データを取得する。蓄積した過去の温湿度実測値と気象予報データに基づき、翌日の結露リスクを予測し、リスクが高い場合は施設使用者の端末に電子メールで通知を行う構成としている。

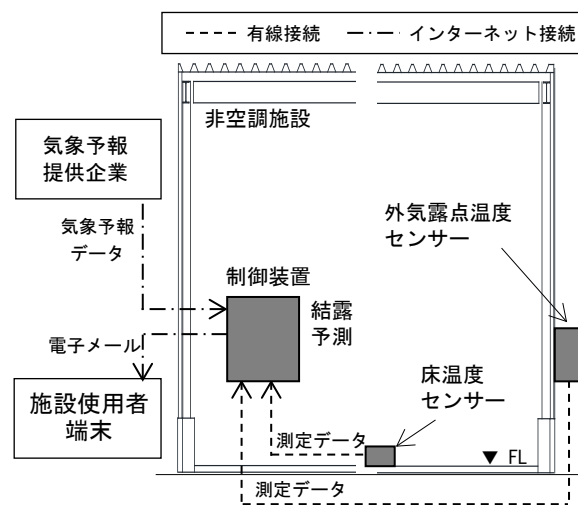


図1 機器構成

2.2 床温度予測方法

床面結露は、床温度が露点温度を下回る場合に生じるため、前日に床面結露の発生を予測するには、先ず翌日の床温度を予測する必要がある。翌日の床温度予測は、実測した温湿度データに基づいて予測式を作成し、気象予報から得られるデータを予測式に入力することで行った。

予測式の概要を式(1)および表1に示す。予測式は、最小二乗法を用いて作成するものとした。過去7日間で蓄積した各時刻の床温度および外気温度、当該時刻から1時間前の床温度、当該時刻から過去24時間の平均床温度の実測値を用い、最小二乗法により係数および切片を導出している。係数および切片は、季節や施設の運用状況によって変化するため、予測式は1日1回の頻度で更新するものとした。

外気温度は、気象予報によって取得可能なデータ項目のうち、床温度に対して最も大きく影響する項目であることから入力値として用いた。また、床温度の変動は熱容量による影響を受けるため、1時間前の床温度および過去24時間の平均床温度を入力値に加えて床温度の変動傾向を反映することで、熱容量による時間遅れや地温の影響等を考慮している。

床温度の予測値は、24時間先までの気象予報データに基づく入力値を予測式に入力することで時刻別に算出する。なお、入力値に1時間前の床温度および過去24時間の平均床温度が含まれているため、予測式作成時刻から2時間先以降はこれらの入力値が実測値として存在しないことになる。このため、2時間先以降は前時刻までに予測した床温度を入力値として用いることによって当該時刻の床温度を算出するものとした。

$$T_f = A_1 T_g + A_2 T_{fb} + A_3 T_{fa} + B \quad (1)$$

T_f : 当該時刻の床温度[°C]
 T_g : 当該時刻の外気温度[°C]
 T_{fb} : 1時間前の床温度[°C]
 T_{fa} : 過去24時間の平均床温度[°C]
 $A_1 \sim A_3$: 係数[-]
 B : 切片[-]

表1 予測式概要

予測方法	最小二乗法
算出値	床温度
入力値	外気温度、1時間前の床温度、過去24時間の平均床温度
予測式作成頻度	1回/日（正午）
予測期間	先24時間（1時間単位 24点）
データセット	過去7日間実測値

2.3 結露リスク予測方法

床面結露が発生する可能性（以下、結露リスク）は、床温度が外気露点温度を下回る場合に、換気やシャッターの開放によって外気が侵入することで高くなる。このため本研究では、予測した翌日の床温度と外気露点温度の気象予報値との差分 ΔT （床温度予測値－外気露点温度予報値）を時刻別に算出し、 ΔT の日最低値が任意の閾値を下回る日を、結露リスク発生日と判断するものとした（図 2 参照）。

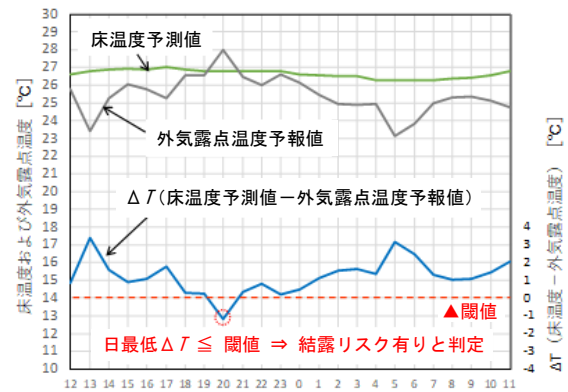


図 2 結露リスク予測方法

3. 試験概要

予測した床温度の妥当性と結露リスク予測の正答率を確認するため、予測手法を搭載したシステムを製作し、稼働中の実物件において運用試験を実施した。対象物件は福岡県に建設された 2 階建ての物流施設である（表 2 参照）。図 3 に対象物件における機器配置を、表 3 に運用試験概要を示す。試験期間は床面結露の発生しやすい 4 月から 9 月にかけての半年間とした。気象予報データには気象庁の提供する MSM モデルを用い、予測式作成時刻（正午）から 24 時間先までの外気温度および外気露点温度をインターネットを経由して取得するものとした。床面温度センサーの設置位置は施設の運用に支障のない様、施設管理者との協議の上で選定しており、温度が低くなりやすい室内中央付近とした。

表 2 試験対象物件概要

用途	物流施設
建設地	福岡県
構造	鉄骨造
外壁仕様	断熱サンドイッチ金属パネル t=35mm
屋根仕様	二重折板工法 GW10K 100mm
1階床仕様	土間コンクリート200mm（浸透性表面硬化剤仕上げ） ＋ ポリエチレンフィルム0.15mm
階数	地上2階建て
建築面積	11401.47㎡
延床面積	22039.92㎡
平均天井高	6.62m

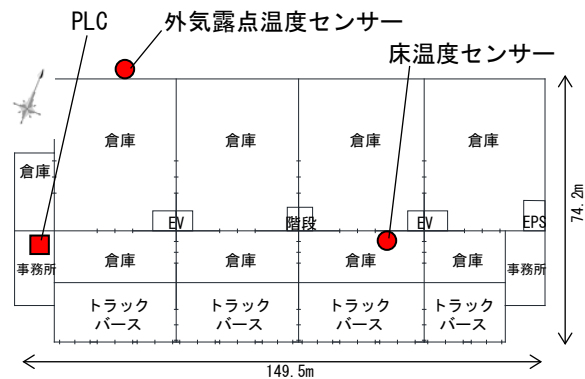


図 3 対象物件機器配置（1 階平面図）

4. 試験結果

4.1 床温度予測の妥当性

予測した床温度が結露リスク予測の判断に用いるのに妥当な精度であるかを検証するため、床温度予測値と床温度実測値の誤差を確認した。

表 4 および図 4 に試験期間における誤差の集計結果を示す。前日の段階で予測した同時刻の床温度予測値から、センサーで得た 1 時間ごとの床温度実測値を差し引いた誤差を集計した。なお、表中の誤差は±に関わらず大きさを評価するため絶対値としている。期間を通しての平均誤差は 0.19 と小さく、月毎の格差もほぼ見られなかった。実測値と予測値の相関は高く、時刻別誤差の発生頻度は 0.5℃未満が 95%以上を占めていた。

誤差が小さく抑えられる理由としては、予測式を 1 日毎に更新していることが挙げられる。図 5 に床温度の誤差が最大となった時刻を含む 5 月 10

表 3 運用試験概要

試験期間		2023年4月1日 ～ 2023年9月30日
実測内容	測定項目	床温度、外気露点温度
	測定機器	床温度： 表面温度測定用センサ R060-31（チノー社製） 外気温湿度： 壁取付形温湿度計 HN-EKA1N（チノー社製）
	測定間隔	60分
予測内容	予測項目	床温度および結露リスク
	予測対象期間	翌日（24時間）
	床温度予測間隔	1時間
気象データ	数値予報モデル	MSMモデルGPV
	対象範囲	5kmメッシュ
	項目	外気温度、外気露点温度
	予報期間	24時間先まで
	データ間隔	1時間

日正午から5月12日正午までの48時間の外気温度および床温度推移を示す。誤差は5月11日12時に最大となっており、主要因は気象予報によって得た外気温度予報値と外気温度実測値の誤差である。5月10日12時に予測式を作成した後、徐々に床温度の実測値と予測値の誤差が大きくなっている。5月10日午後の外気温度推移をみると、実測値では16時をピークに12時以降気温が上昇しているのに対して、予報値では12時以降気温が低下している。これにより、外気温度予報値を入力値とする各時刻の床温度予測値が実測値よりも低くなっている。また、入力値には1時間前までに予測した床温度が含まれていることから、前時刻の予測値の誤差の大きさが当該時刻の誤差にも影響するため、当該期間のように外気温度予報値のピーク時刻がずれることによっても誤差は大きくなりやすい。ただし5月11日12時に予測式を更新することで、12時以降は誤差が小さくなっており、結果として誤差は最大でも1℃程度で抑えられている。

以上の結果から、翌日の床温度は概ね良好に予測可能であり、結露リスク予測の判断に用いるのに妥当な精度を有していると判断した。

4.2 結露リスク予測の正答率

表5に通期の結露リスク発生日における予測正答率を示す。日最低 ΔT （床温度－外気露点温度）が閾値以下となる場合を結露リスクのある日と判断するものとし、閾値には0と-2の二つを設定した。実測値での日最低 ΔT が閾値以下となる日の年積算値を発生日数、それらのうち予測値での日最低 ΔT が閾値以下となった日の年積算値を予測正答日数として集計し、予測正答率は予測正答日数を発生日数で除した値とした。予測正答率は $\Delta T \leq 0$ では92%、 $\Delta T \leq -2$ では96%といずれも高い結果となった。参考として図6に実測値での日最低 ΔT が各閾値を下回った日を含む期間における外気露点温度と床温度および ΔT 推移を示す。

以上の結果から、本研究で検討した予測手法を用いることで、実物件における結露リスクを前日までに予測可能であることを確認できた。

表4 床温度予測値と実測値の誤差結果

期間	平均誤差 [°C] (予測値－実測値)	時刻別誤差の発生頻度		
		0.5°C未満	0.5°C以上 1.0°C未満	1.0°C以上
4	0.19	91.53%	8.47%	0.00%
5	0.20	94.62%	5.24%	0.13%
6	0.18	96.94%	3.06%	0.00%
7	0.20	96.24%	3.76%	0.00%
8	0.19	95.43%	4.57%	0.00%
9	0.17	97.64%	2.36%	0.00%
通期	0.19	95.40%	4.58%	0.02%

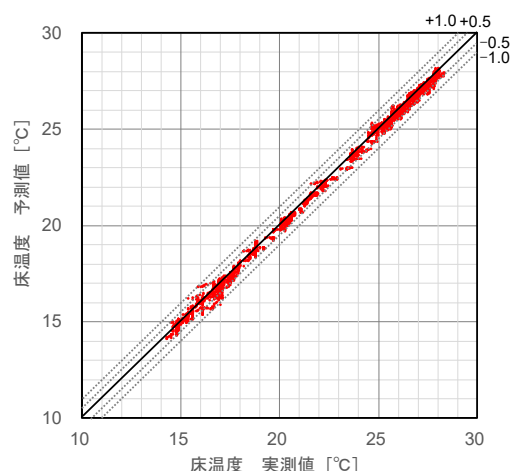


図4 床温度実測値および予測値相関(1時間単位)

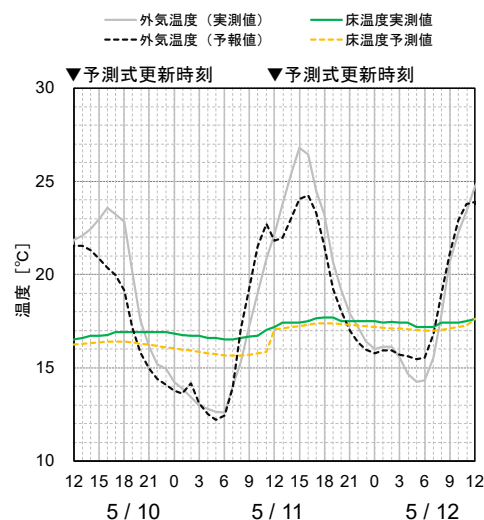


図5 外気温度および床温度時系列推移
(5/10 12:00 ~ 5/12 12:00)

表5 結露リスク発生日における予測正答率

条件	結果		
	結露リスク 発生日数	予測正答 日数	予測正答率 [%]
$\Delta T \leq 0$	66	61	92%
$\Delta T \leq -2$	20	19	95%

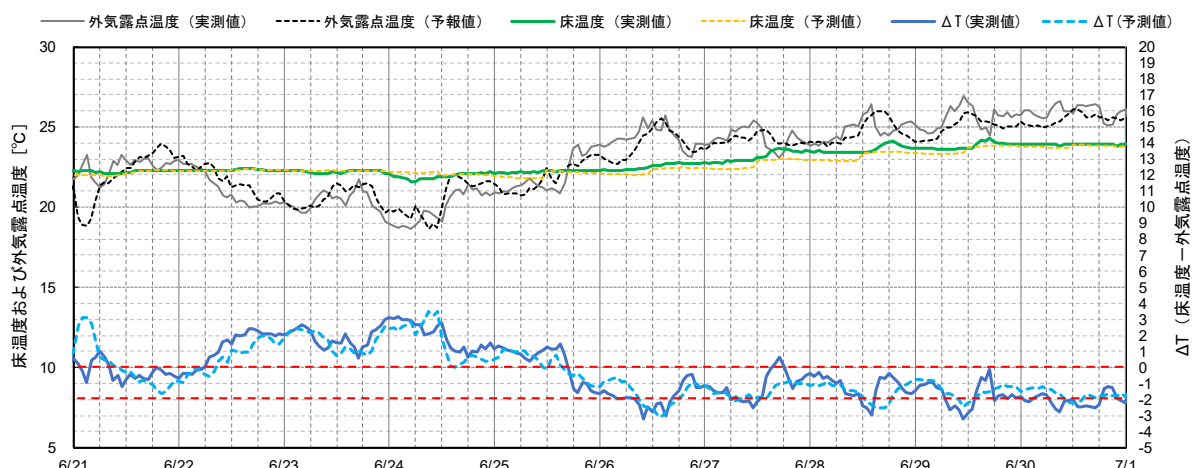


図6 外気露点温度と床温度および ΔT 推移（2023年6月21日～6月30日）

5. まとめ

本研究では、温湿度実測値と気象予報情報を用いて、床面結露の発生リスクを発生日前日までに予測する手法を検討し、実物件において運用試験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 床温度を過去の実測値の相関から予測し、外気露点温度予報値との差分 ΔT （床温度－外気露点温度）の日最低値が、任意の閾値を下回る場合を結露リスクのある日と予測する手法を構築した。
- (2) 床温度の予測値と実測値との誤差は、年間平均で 0.19°C と小さく、翌日の床温度は概ね良好に予測可能であった。
- (3) 結露リスク予測の正答率は、日最低 ΔT の閾値を0以下とした場合および -2 以下とした場合のいずれにおいても90%以上の高い値となり、本予測手法により前日までに結露リスクの予測が概ね可能であったことを確認した。

今後は本研究で考案した予測システムを他の実物件へも導入し、予測精度のさらなる向上と換気

扇の自動停止等による結露の抑制手法を検討する予定としている。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本建築学会：建物における湿害の診断と対策に関する基準・同解説，一般社団法人 日本建築学会，2013.
- 2) 榎藤尚，新橋正博，荒井良延，寒河江昭夫：生産・物流施設における夏型結露防止に関する研究：その1 夏型結露現象と気象要素との関連，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.417-418，2005.
- 3) 新橋正博，榎藤尚，荒井良延，寒河江昭夫：生産・物流施設における夏型結露防止に関する研究：その2 夏型結露の発生パターンと対策効果の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.419-420，2005.

執筆者紹介

ひとこと

地球温暖化に伴い、日本の気候は年々変化しています。本研究で取り上げた床面結露に限らず、従来は起き得なかった問題が顕在化しつつあり、これらへの適応は喫緊の課題となっています。今後も快適な室内環境の実現を目指し、研究を行っていきます。



黒木 洋
博士（人間環境学）