

濡れ時間算出のための相対湿度閾値決定法の検討

掛水海翔

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

本研究では、気象データを用いた濡れ時間推定手法の高精度化を目的として、相対湿度の閾値決定手法を検討した。ACM センサおよび葉面濡れセンサの観測データに加え、赤外線カメラ画像を用いて実際の濡れ始め時刻を特定し、相対湿度の閾値を導出した。その結果、濡れ始めの相対湿度閾値は従来手法より低い値となったものの、より実態に即した濡れ時間推定が可能であることが示唆された。

Key Words : サーマルカメラ, 赤外線カメラ, ACM センサ, 葉面濡れセンサ

1. 序論

(1)背景

社会資本を長期間にわたり供用するためには、疲労および腐食などの損傷を発生させる環境作用、およびその進行に留意して適切かつ継続的な維持管理が必要となる¹⁾。建造物の維持管理のための大気腐食環境評価は大きく二つ、腐食挙動を測定する手法と腐食に影響を及ぼす環境因子を測定する手法があり、特に環境条件を適切に評価することが極めて重要である。建造物の大気腐食の影響を評価する指標の一つとして用いられている「濡れ時間」は、一般的に気温と相対湿度(以下、RHとする)の値から推定されるものであり、ISO9223では「気温0℃以上、RH80%以上の継続時間」と定義されている。濡れ時間を求める方法には、ISO9223のように気象データから求める方法と、ACM センサや葉濡れセンサにより計測する方法がある。ISO9223は地球規模のマクロな大気環境の腐食性を幾つかのレベルに分類するために用いるもので本来、建造物の局所的な環境を比較するものではない²⁾。また、ACM センサや葉面濡れセンサでの計測では、濡れ状態とする閾値が必要となる。従って、改めて気象データから推

定される濡れ時間とセンサにより計測される濡れ時間の違いを検討し、従来の気象データを用いた濡れ時間推定手法の精度検証とセンサでの濡れ状態とする閾値決定手法の検証を行う必要がある。そこで、気象データを用いた濡れ時間推定手法の精度向上のため、RHの閾値決定手法を検討する。

また、気象データを用いて高精度に濡れ時間を推定することができれば、広域の濡れ時間マップの整備が可能になり、建造物の維持管理計画の立案に役立つと考える。

2. 手法

(1)研究フロー

本研究のフローを図-1に示す。まず、10分間隔で気象観測、1分間隔でACM センサ、葉面濡れセンサによる観測を行う。また、サーマルカメラと赤外線カメラでポリプロピレン製のボックスの撮影を行い濡れ始めの閾値候補を求める。その閾値候補を用いて気象観測データと各センサ観測データをそれぞれ二値化し、相関係数、F1スコア、一致率の値が最も

高くなる時の RH を最終的な閾値とする。

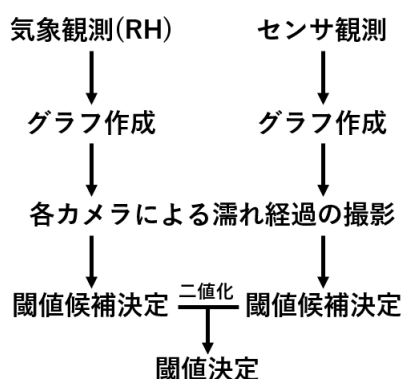


図-1 RH の閾値設定フロー

(2) 観測方法

観測機器は高知工科大学地域連携棟駐車場に設置し、気象ステーション(Onset 社製気象観測用スマートセンサ温度/湿度センサ S-THB-M002 等)、ACM センサ(植田工業株式会社製大気中金属腐食モニタリングユニット(PG5000))および葉面濡れセンサ(Onset 社製 S-LWA-M003)により観測を行った。気象観測では、気温、RH、風向、風速、降水量、PAR(光合成有効放射量)の観測を 10 分間隔で行う。ACM センサと葉面濡れセンサは 1 分間隔で観測を行う(図-2)。ACM センサは、環境因子により電気化学的に発生する金属の腐食電流を直接計測できるセンサである。降雨や結露などによって基板金属と導電ペースト間に薄い水膜が形成され、電流が流れる。この電流は腐食速度と良い相関関係がある³⁾。葉面濡れセンサは、センサーグリッドの濡れ割合を計測する。完全に乾燥している場合は 0%、全面が水分で覆われている場合は 100%となる。



図-2 ACM センサ(右)および葉面濡れセンサ(左)

(2) 研究の独自性

赤塚⁴⁾は RH から求めた濡れの有無とセンサで求めた濡れの有無の一致率が最大となるように、RH の閾値を決定した。しかし、一致率が最も高い値となるときに、センサが実際に濡れているかどうかを確認していなかった。

本研究では、新たに ACM センサ、葉面濡れセンサの観測データの変化量を用いて濡れ始めとみなす時刻を検討する。この時、サーマルカメラや赤外線カメラ(トレイルカメラ)で確認することで、閾値を決定する。これにより気象データを用いた濡れ時間推定手法の高精度化が期待できる。

(3) 閾値候補の検討

(a) センサの 10 分平均と変化量のグラフ作成

ACM センサ、葉面濡れセンサの 10 分毎の統計量を計算し ACM と RH、葉面濡れセンサと RH の毎日の時間変化グラフを作成する。作成したそれぞれのグラフに出力変化量⁶⁾を加え、出力が正の最大変化を示した時刻の各センサの出力と RH を抽出し閾値を決定する。グラフ内の棒グラフが変化量を表す。(図-3、図-4)

(b) サーマルカメラでの撮影

サーマルカメラを用いて ACM センサおよび葉面濡れセンサを撮影し、センサと RH の閾値候補を検討する。サーマルカメラは HIKMICRO Pocket2 を使用し、1 分間隔でのタイムラプス撮影を行う。撮影は晴れの日の夕方、日が沈むタイミングで行い、結露による温度変化を確認する。結露が起ると表面温度が低下すると予想し、温度が低下し大きく色の変化が起こる時刻を「濡れ始め」とする。

(c) 赤外線(トレイル)カメラ撮影

各センサのロガーを収納しているポリプロピレン製のボックスを 1 分間隔で撮影する。濡れが見られた時刻の画像と同時刻のサーマルカメラの画像を比較し、濡れが正確であることを確認する。ボックスに結露が生じると、赤外線カメラ画像上では、ボッ

クスの色調が暗く変化し、その後、水滴が反射して光って見えるようになる。本研究では、水滴が光って見え始める時点を「濡れ始め」とみなす。

補を決定する。

(4)RHの閾値決定法

(3)で決定した閾値候補を用いて ACM センサ、葉面濡れセンサ、RH の 10 分毎の観測データそれぞれに対して、「乾燥状態」か「濡れ状態」を判定し、二値データを作成する。この時、閾値以上を出力する場合は濡れとみなし 1、閾値未満を出力する場合は乾燥とみなし 0 とする。各閾値候補を用いて作成した ACM センサの二値データと RH の二値データの相関係数の計算、さらに混同行列を作成し、F1 スコアを計算する。相関係数、一致率、F1 スコアの値が 1 に近い閾値候補の組み合わせを RH の閾値とする。同様に葉面濡れセンサと RH の相関係数、一致率、F1 スコアを計算し、RH の閾値を求める。

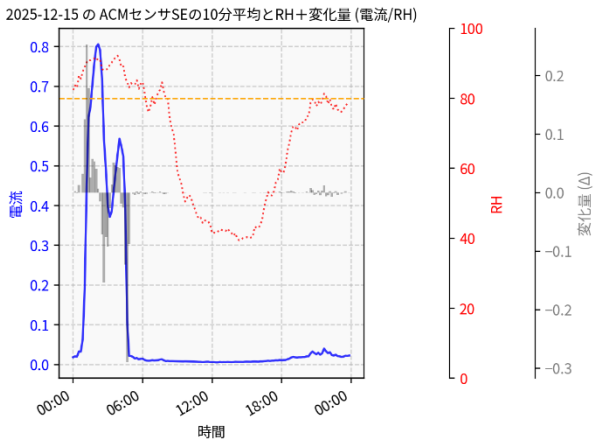


図-3 ACM センサと変化量のグラフ

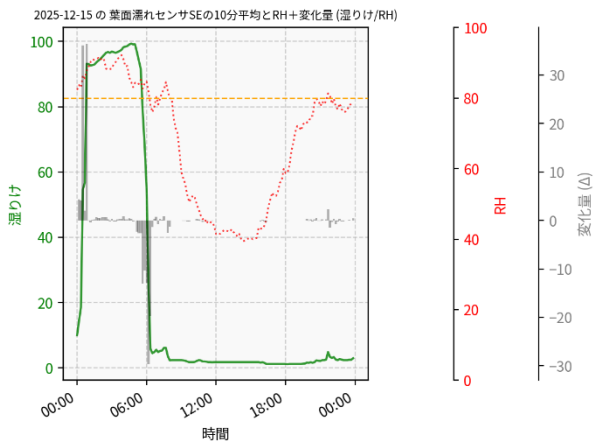


図-4 葉面濡れセンサと変化量のグラフ



図-5 サーマルカメラ画像



図-6 赤外線カメラ画像

(c)閾値候補の決定

サーマルカメラ画像および赤外線カメラ画像で決定した濡れ始めの時刻と、各センサの変化量、RH の値を比較することで、RH および各センサの閾値候

3. 結果及び考察

(1)RH および各センサの閾値候補決定

はじめに、サーマルカメラで 1 分毎に撮影した画像で色の変化は確認できた。しかし、ACM センサおよび葉面濡れセンサの変化量のグラフや赤外線カメラなどで濡れとみなす時刻の画像を確認すると、濡れていない時の画像との色の変化がわかりにくかった。よって、サーマルカメラ画像での濡れ始めは判断しづらいため、今回は赤外線カメラ画像のみで濡れ始めの時刻を決定する。

表-2 濡れ始めの RH・ACM・葉面濡れセンサ出力

時刻	RH(%)	ACMセンサ(μA)	葉面濡れセンサ(%)
2025/11/22 17:10	73.8	0.028	1.76
2025/11/23 17:30	74.7	0.027	1.76
2025/12/14 19:20	79.2	0.031	1.76
2025/12/15 20:30	78.7	0.028	1.76

表-2 は赤外線カメラで撮影した画像から水滴を確認したとき(図-7, 図-8)の RH, ACM センサ、葉面濡れセンサ出力である。ACM センサはいずれも電流 0.03μA 程度を出力し、葉面濡れセンサでは湿り気 1.76%を出力する。その時、RH は 75~80%程度

が出力された。本研究では、表-2 に示す4つの時刻の RH, ACM センサ、葉面濡れセンサ出力を閾値候補に決定した。いずれの閾値候補も先行研究で決定した閾値よりも小さい値となった。

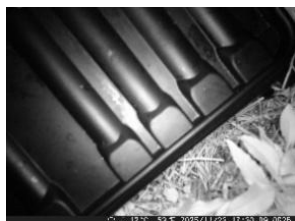


図-7 11/23 カメラ画像 図-8 12/15 カメラ画像

(2)RH および各センサの閾値決定

表-2 の葉面濡れセンサの閾値候補 1.76%は値が低いため、二値化を行うと、乾燥している日中を含め、ほとんどの時間で濡れ状態と判定された。そのため、葉面濡れセンサと RH の一致率の計算からは閾値を決定することは難しい。よって、本研究では ACM センサを用いて RH の閾値を求めることにした。表-2 の4つの時刻で赤外線カメラ画像による水滴の確認ができた。その際の ACM センサと RH の出力値を閾値とした時の ACM センサおよび RH の二値データの相関係数は 0.75~0.78, F1 スコアは 0.88~0.90, 一致率は 0.86~0.89 とどの時刻の候補値を用いても、同程度の評価値となった(表-3)。ACM センサの候補値では 0.028~0.031 μ A と大きな差がなく、RH の候補値でも 74~79%と大きな差がないため、4つの時刻の平均値を閾値とした。よって、本研究では ACM センサ 0.028 μ A, RH76.6%を閾値に決定した。また、この閾値を用いた場合の相関係数は 0.77, F1 スコアは 0.90, 一致率は 0.88 となった。RH の閾値は先行研究の結果を下回っており、これは先行研究の結果よりも低い値で濡れが始まると考えられる。一方、相関係数, F1 スコア, 一致率は同程度で、RH の閾値が先行研究よりも低い値でも評価指標の値は低下しなかった。本研究では、実画像に基づいて濡れ始めを特定し RH 閾値を算出したことで、既往研究と比べてより実測に基づく信頼性の高い閾値が得られたことが示唆される。

表-3 ACM と RH の相関係数と F1 スコアと一致率

時刻	相関係数	F1スコア	一致率
2025/11/22 17:10	0.745	0.882	0.863
2025/11/23 17:30	0.761	0.891	0.875
2025/12/14 19:20	0.783	0.895	0.889
2025/12/15 20:30	0.782	0.898	0.890

4. まとめ

本研究では、気象データを用いた濡れ時間推定手法の精度向上のため、相対湿度の閾値決定手法を検討した。赤外線カメラ画像から水滴が確認できた時刻の ACM センサ出力と相対湿度の値から、濡れ始めの閾値は 76.6%と求められた。しかし、今回赤外線カメラで撮影したボックスは ACM センサの素材と異なるため、結露のタイミングに違いがでる可能性がある。また、濡れ時間を算出するためには濡れ始めだけでなく濡れ終わりの時刻を把握することも重要であり、乾燥状態へ移行する際の相対湿度および ACM センサの閾値を明らかにする必要がある。さらに、季節による気温の変化や風、日射量なども考慮し精度を高めていくことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 原修一, 上村隆之, 門長猛, 幸英昭: 山間部橋梁桁各部位の実測結露時間によるぬれ環境評価. 材料と環境. 2006
- 2) 土木学会 鋼構造委員会: 第II編 腐食した鋼構造物の耐久性向上方策, 2005
- 3) 株式会社シュリンクス: ACM センサ計測の原理と概要: <https://corrosi.com/acm-spec/about-acm.htm>
- 4) 赤塚慎: 気象データを用いた構造物の濡れ時間推定に関する基礎的研究. (一社)四国クリエイト協会建設事業の技術開発に関する助成事業成果報告書. 2025.
- 5) @IT AI・機械学習の用語辞典 [評価指標] F 値 (F-measure, F-score) / F1 スコア (F1-score) とは?: <https://atmarkit.itmedia.co.jp/ait/articles/2210/24/news034.html>
- 6) 岩崎英治, 三浦正純, 恩田駿秀, 野添裕輔, 中嶋龍一郎: 直流電気抵抗の変化量による腐食鋼材の濡れ時間判定に関する検討. 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM). 2014