

〔原著論文〕

近傍における気象観測記録を用いた特定牛舎所在地の温湿度推定法の検討

Estimating outside temperature and relative humidity information at a farm
with meteorological observation records from nearest weather stations

小川伸一郎・星野洋一郎・横井伯英

Shinichiro OGAWA, Yoichiro HOSHINO, Norihide YOKOI

京都大学大学院農学研究科 京都府京都市左京区 〒606-8502

Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502

要約

京都大学大学院農学研究科附属牧場（京大牧場）を対象に、近傍地点における気象観測記録から特定地点の温湿度情報を推定する方法について検討した。温湿度情報が取得可能な気象観測地点のうち京大牧場の最近傍2地点であるアメダス園部地点およびアメダス美山地点を選択し、それらの経度・緯度・標高ならびに2023年の1年間にわたる日平均気温（℃）および日平均相対湿度（%）のデータを取得した。気温減率を6.5℃/kmとした標高補正を施したのち、地点間の水平距離の二乗に反比例する形とした逆距離加重法により京大牧場地点の気温および相対湿度を推定し、温湿度指数（THI）も算出した。京大牧場地点における推定日平均気温および相対湿度と推定日平均THIとの相関係数はそれぞれ0.999および-0.077であった。2023年のうち推定日平均THIが68および72以上であった日数は、5月17日から11月6日までの間にそれぞれ120日および90日存在した。さらに、2024年の6月5日から9月22日の間に温湿度データロガーで得られた実測値と推定値の相関係数を求めたところ、気温、相対湿度、THIいずれについても0.9を上回ったことから、標高補正した気象観測記録を用いた逆距離加重法による温湿度推定法の有用性が示唆された。

キーワード：気象観測記録、標高補正、逆距離加重法、温湿度指数、黒毛和種

Key words : meteorological observation records, altitude correction, inverse distance weighted method, temperature-humidity index, Japanese Black cattle

緒 言

近年の気候変動はわが国の畜産全般に甚大な被害をもたらしているものであり、高品質な和牛肉生産の持続的発展にとっても有効な温暖化対策が喫緊の課題である^{1,2)}。黒毛和種の生産成績は季節や月によって変動していることがこれまでに繰り返し報告されており^{3,4,5)}、これら変動の少なくとも一部は暑熱負荷など温熱環境の影響を反映している可能性が考えられる。暑熱負荷の影響を調べるには、飼育環境下における温湿度情報が必要である。しかし、温湿度情報を継続的に直接観測できる環境構築に際し、工事費用や電力逼迫などの課題が生じうる。一方で、わが国では気象観測網が発

達しており、長期間にわたる気象観測記録が無償利用可能である。これらを活用すれば、新たな投資の必要なく、特定地点における環境温湿度に関する情報を過去に遡って把握可能と期待される^{6,7)}。実際、国内のホルスタイン種や純粋種豚集団を対象に、気象観測記録を活用した耐暑性育種手法の開発研究が推進されてきている^{8,9,10)}。

黒毛和種の受胎率^{11,12)}や空胎期間^{13,14)}を対象とした先行研究では、農場内暑熱環境に関する代替指標として最近傍の1地点における気象観測記録との関連性が調べられている。しかし、いずれの先行研究においても農場内温湿度を実測していない。別の先行研究^{6,7)}では、近傍の複数地点における気象観測記録を用いた

受付 2024年12月27日 受理 2025年2月15日

連絡者：小川伸一郎（tel : 075-753-6331, e-mail : ogawa.shinichiro.4h@kyoto-u.ac.jp）

推定性能が調べられているが、対象項目は気温のみである。本研究では、京都大学大学院農学研究科附属牧場（京大牧場）を対象に、逆距離加重法と呼ばれるアプローチを用いて、近傍の複数地点における気象観測記録を用いた外環境温湿度の推定法について検討した。加えて、比較的短期間ではあるが、牛舎内温湿度を実測し、推定値と比較した。

材料および方法

まず、温湿度情報の推定対象である京大牧場地点の経度・緯度・標高情報を google map 機能を用いて取得した。次に、推定に用いる気象観測記録の取得先候補であるアメダス園部観測所、アメダス美山観測所、京都市気象台およびアメダス福知山の経度・緯度・標高情報を気象庁 HP (<https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/>) より取得した。取得した経度・緯度情報にもとづき、以下のサイト (<https://keisan.casio.jp/exec/system/1257670779>) を利用して2地点間の水平距離を求めた。また、気象観測記録として、アメダス園部地点およびアメダス美山地点における2023年1月1日から同年12月31日までの日平均気温 (°C) および日平均相対湿度 (%) のデータを気象庁 HP よりダウンロードした。

本研究における京大牧場地点の温湿度推定は、標高補正後の複数地点の気象観測記録を用いた逆距離加重法によった。平均気温 t の標高補正には以下の式を用いた：

$$t_c = t_o - C \times h$$

ここで、 t_o はアメダス園部地点またはアメダス美山地点における平均気温、 t_c は同地点の標高補正済平均気温、 h は京大牧場地点とアメダス園部地点またはアメダス美山地点との標高差 (km)、 C は気温減率であり、ここでは先行研究^{6,7)} と同じく標準大気の大気圏における気温減率である 6.5 (°C/km) とした。

相対湿度 U の標高補正は以下の流れとした。まず、 U の計算式は以下の通りである：

$$U_o = \frac{e_o}{es_o} \times 100$$

$$U_c = \frac{e_c}{es_c} \times 100$$

ここで、 e は水蒸気圧 (Pa)、 es は飽和水蒸気圧 (Pa)

であり、下付き文字 o および c はそれぞれ標高補正前および標高補正後を意味する。次に、飽和水蒸気圧 es は、次の式で計算した：

$$\ln(es_o) = -6096.9385 \times T_o^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2} \times T_o + 1.673952 \times 10^{-5} \times T_o^2 + 2.433502 \times \ln(T_o)$$

$$\ln(es_c) = -6096.9385 \times T_c^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2} \times T_c + 1.673952 \times 10^{-5} \times T_c^2 + 2.433502 \times \ln(T_c)$$

ここで、 T は絶対温度 (K) であり、 $t + 273.15$ で表される。 $\ln ()$ は自然対数である。続いて、絶対湿度 D (g/m³) を以下のとおりに計算した：

$$D_o = \frac{0.794 \times 10^{-2} \times e_o}{1 + 0.00366t_o}$$

$$D_c = \frac{0.794 \times 10^{-2} \times e_c}{1 + 0.00366t_c}$$

ここで、 $D_o = D_c$ と仮定すれば、 e_o および e_c を消去することで以下の等式が導出できる：

$$U_c = \frac{1 + 0.00366t_c}{1 + 0.00366t_o} \times \frac{es_o}{es_c} \times U_o$$

最終的に、 U_o および t_o にアメダス園部地点またはアメダス美山地点における気象観測記録を、 t_c にその標高補正値をそれぞれ代入して標高補正済の平均相対湿度 U_c を得た。

標高補正を施したアメダス2地点の気象観測記録および京大牧場地点との水平距離を用いた逆距離加重法により京大牧場地点における環境温湿度を推定した：

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^2 d_i^{-\lambda} x_i}{\sum_{i=1}^2 d_i^{-\lambda}}$$

ここで、 x は気温もしくは相対湿度が該当し、 d は水平距離 (km) である。先行研究^{6,7)} では $\lambda=1$ が採用されているが、本研究では、 λ の値としてよく用いられる $\lambda=2$ を採用した¹⁶⁾。日平均気温および日平均相対湿度の推定値を用いて、不快指数または温湿度指数 (temperature-humidity index; THI) の値を以下の式により計算した¹⁵⁾：

$$THI = 0.8 \times t + U \div 100 \times (t - 14.4) + 46.4$$

追加検討として、京大牧場牛舎内に温湿度データロガー (おんどとり TR72A2-S, 株式会社ティアンドデイ) を3台設置して温湿度情報を実測し、気象観測記録に

もとづく推定値と比較した。ロガーによるデータ取得は10分間隔とし、2024年6月5日から2024年9月22日までの実測結果を用いた。なお、ロガー1は天井が高い牛舎内にて地面から約2 mの高さに、ロガー2は天井が低い牛舎内で地面から約2 mの高さに、ロガー3は天井が低い牛舎内で地面から約1.5 mの高さにそれぞれ設置した。さらに、ロガー実測値を用いて逆距離加重法における λ の最適化に関する簡単な検討を加えた。 λ の値を0から10まで0.01刻みで変化しつつ、実測値と推定値との単相関係数 R に加えて、決定係数 R^2 、平均絶対誤差MAEおよび二乗平均平方根誤差RMSEを以下の通りに計算した：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

$$MAE = \frac{\sum_i |x_i - \hat{x}_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}$$

計4つの指標それぞれのうち、 R および R^2 については最大、MAEおよびRMSEについては最小とする λ の値をグリッドサーチした。

結果と考察

京大牧場地点の温湿度推定に用いたアメダス園部地点およびアメダス美山地点に加えて、京都地方気象台およびアメダス福知山地点それぞれの京大牧場地点からの水平距離 d およびその二乗値の逆数 d^{-2} を図1に示

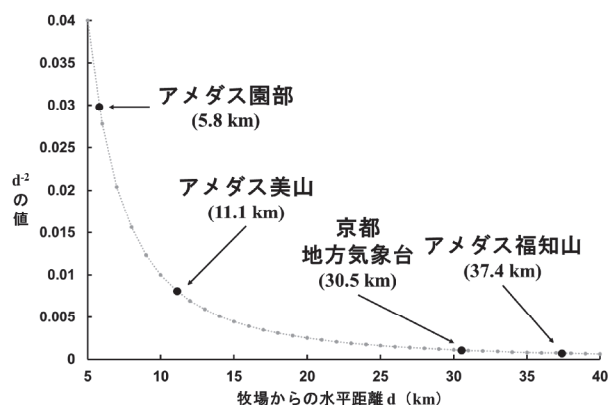


図1 京大牧場近傍の気象観測地点と京大牧場地点との水平距離 d （横軸）およびその二乗値の逆数 d^{-2} （縦軸）

した。本研究では、逆距離加重法における重み付け値 d^{-2} が相対的にとくに大きかったことから、アメダス園部地点およびアメダス美山地点の2地点のみを用いることとした。なお、アメダス園部地点およびアメダス美山地点から京大牧場地点への方位角はそれぞれおよそ 37° および 206° 、京大牧場地点、アメダス園部地点およびアメダス美山地点の標高はそれぞれおよそ149 m、134 mおよび200 mであった。2023年の1年間における気象観測記録の2地点間における相関係数は、日平均気温および日平均相対湿度でそれぞれ0.997および0.939と非常に高い値であった。

京大牧場地点における日平均気温、相対湿度およびTHIの推定結果を図2に示した。日平均気温では公転運動にともなう年内変動が明瞭に表れた一方で、相対湿度では明確な周期変動は観察されなかった。ここでの外環境温湿度の変動様相については、京大牧場やアメダス2地点を含む京丹波町および南丹市における気候の特徴を反映したものと考えられる。気温および相対湿度とTHIとの相関係数はそれぞれ0.999および -0.077 であった。この結果は、THIの代替として気温の利用可能性を示したSato^ら⁷⁾の報告に沿うものである。ホルスタイン種では暑熱ストレスに関するTHIの閾値として72が広く用いられているが、近年では閾値を68とする場合もみられる¹⁷⁾。推定日平均THIに

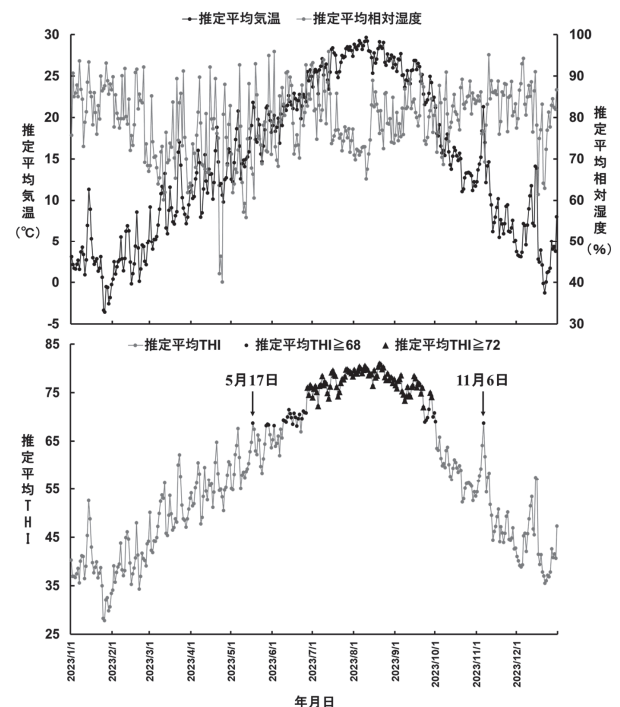


図2 2023年の1年間における京大牧場地点の推定日平均気温（上図左縦軸）、相対湿度（上図右縦軸）およびTHI（下図縦軸）の推定結果

もとづけば、2023年においてTHIが68および72以上であった日数は、5月17日から11月6日までの間で120日および90日存在した。黒毛和種におけるTHIの閾値が明らかとなれば、和牛生産により即した運用について検討できるだろう。

気象観測記録にもとづく京大牧場地点の推定値と各ロガーによる実測値との比較結果を図3にまとめた。まず、異なるロガー間における気温、相対湿度およびTHIの単相関係数はそれぞれ0.995から0.997、0.989から0.992および0.998と、いずれも非常に高い値であった。また、推定値と実測値との間の単相関係数は、気温、相対湿度およびTHIでそれぞれ0.991から0.994、0.969から0.970および0.996から0.997の範囲であり、ロガーの違いを問わず非常に高かった。この結果は、気象観測記録にもとづく推定値の指標としての有用性を支持するものである。一方で、僅かではあるが、気温およびTHIでは推定値の方が低く、相対湿度では推

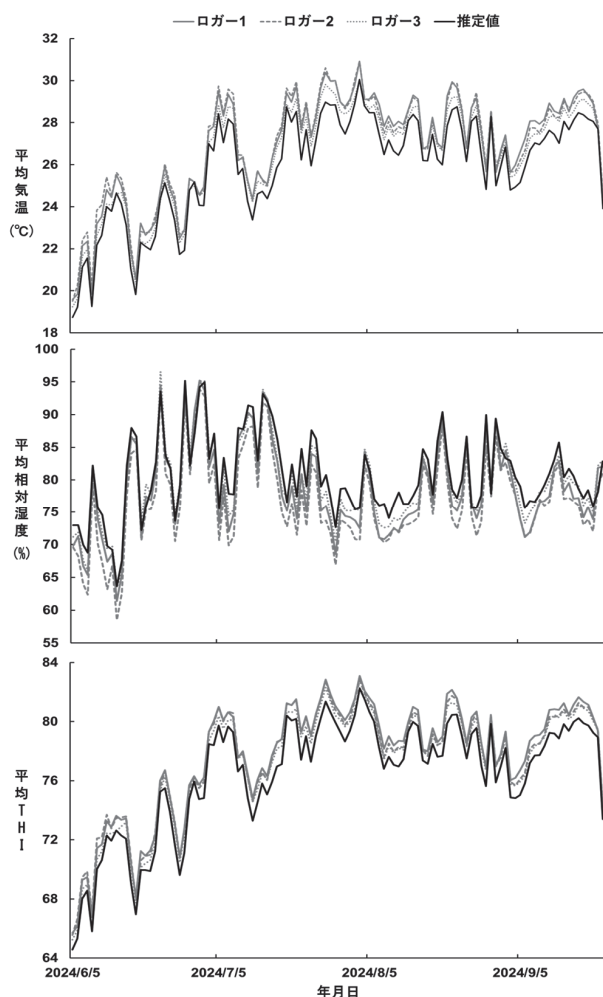


図3 データロガーによる温湿度実測値と気象観測記録を用いた推定値との比較結果（上：平均気温，中：相対湿度，下：THI）

定値の方が高く偏る様相が見て取れた。以上の結果については、対象地点の気候条件に加え、牛舎構造や空調管理、ロガーの設置場所なども関連する可能性が考えられる。

グリッドサーチによる λ のチューニング結果を表1にまとめた。Rを基準としたとき、0.52から2.25の範囲で値が選択された。一方で R^2 、MAEおよびRMSEを基準としたとき、ほとんどの場合でグリッドサーチ幅の最大値である10が選択された。この結果は、美山地点の情報に対する重み付け値を適切に大きくすることで、推定値と実測値との相関性は改善される一方で推定値の偏りは悪化する可能性を示唆している。気温減率の値を変更することも可能だが、京大牧場地点とアメダス園部地点およびアメダス美山地点との標高差が大きくないことから、劇的な改善効果は見込めないと推察された。また、京大牧場の敷地内にはアメダス須知地点が存在するものの、測定項目は降水量のみであった。したがって、同一地点における施設内外での温湿度差については、屋外にロガーを設置するなど別途の検討が必要であろう。

表1 範囲を0から10までとしたグリッドサーチによるパラメーター λ のチューニング結果

ロガー	評価基準	気温	相対湿度	THI
ロガー1	R	1.35	2.25	1.25
	R^2	10	5.28	10
	MAE	10	5.01	10
	RMSE	10	5.28	10
ロガー2	R	1.76	2.14	1.53
	R^2	10	10	10
	MAE	10	10	10
	RMSE	10	10	10
ロガー3	R	0.63	1.13	0.52
	R^2	10	10	10
	MAE	10	10	10
	RMSE	10	10	10

R：単相関係数， R^2 ：決定係数，MAE：平均絶対誤差，RMSE：二乗平均平方根誤差

結論として、京大牧場を例に、新たな金銭的コストの投入なく所定地点における外環境温湿度情報を推定するスキームを提示できたと考える。同様の戦略は国内における任意の生産現場で可能と考えられ^{6,7)}、ホルスタイン種や豚における先行研究^{8,9,10)}のように、黒毛和種の遺伝的能力評価にも転用可能と期待される。また、過去に遡って京大牧場で飼養された黒毛和種に関する各種データと温熱環境情報との関連性に関する調

査が可能となったことから、暑熱期以外での牛舎内実測値と推定値の比較とともに、黒毛和種における暑熱ストレス指標の探索などにも挑戦したいと考えている。

引用文献

- 1) 阪谷美樹. 産業動物臨床医学雑誌, 5 : 238–246. 2015.
- 2) 前田友香. 日本畜産学会報, 92 : 141–148. 2021.
- 3) 前田友香, 西村慶子, 中武好美, 寺田文典, 櫛引史郎. 日本畜産学会報, 88 : 281–291. 2017.
- 4) Sasaki Y, Uematsu M, Kitahara G, Osawa T. Theriogenology, 86 : 2156–2161. 2016.
- 5) Zoda A, Urakawa M, Oono Y, Ogawa S, Satoh M. Journal of Animal Science, 99 : skab265. 2021.
- 6) 佐藤正寛, 日下和樹, 小川伸一郎, 上本吉伸. 日本畜産学会報, 94 : 277–282. 2023.
- 7) Satoh M, Fukuzawa Y, Ogawa S, Okamura T. Animal Science Journal, 94 : e13902. 2023.
- 8) Hagiya K, Atagi Y, Osawa T, Yamazaki T. Animal Science Journal, 91 : e13437. 2020.
- 9) Ogawa S, Okamura T, Fukuzawa Y, Nishio M, Ishii K, Kimata M, Tomiyama M, Satoh M. Journal of Animal Breeding and Genetics, 141 : 656–667. 2024.
- 10) Fukuzawa Y, Ogawa S, Okamura T, Nishio M, Ishii K, Takahashi H, Satoh M. Animal Science Journal, 95 : e13958. 2024.
- 11) Nabenishi H, Yamazaki A. Reproduction in Domestic Animals, 52 : 371–375. 2017.
- 12) Kino E, Uematsu M, Kitahara G, Osawa T, Sasaki Y. Livestock Science, 228 : 170–176. 2019.
- 13) 新垣大地, 及川卓郎. 日本暖地畜産学会報, 62 : 91–98. 2019.
- 14) 新垣大地, 及川卓郎. 日本暖地畜産学会報, 64 : 5–12. 2021.
- 15) Thom EC. Weatherwise, 12 : 57–59. 1959.
- 16) Isaaks EH, Srivastava RM. Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.
- 17) Bernabucci U, Biffani S, Buggiotti L, Vitali A, Lacetera N, Naradone A. Journal of Dairy Science, 97 : 471–486. 2014.