

細霧送風システムのタイストール乳牛舎における暑熱対策の効果

岸本 剛・唐澤哲哉・中沢宏明

Effect of fine mist blower system on tie-stall dairy barn in the summer heat

Takeshi KISHIMOTO, Tetuya KARASAWA, Hiroaki NAKAZAWA

要約 地球温暖化により気密性が高い寒冷地域の乳牛舎における暑熱対策の確立が急務である。そこで、トンネル換気下のタイストール乳牛舎に設置することができる新たな暑熱対策強化システムを開発し、その特性を明らかにした。

- 1 トンネル換気下のタイストール乳牛舎において、ダクトファンを用いて牛床を濡らさずに牛の肩～背部に向けて細霧の間欠吹付けと体表の乾燥をおこなう牛体の気化冷却システム（細霧送風システム）を開発した。その特徴は以下のとおりである。
 - (1) 暑熱時の搾乳牛の体温および呼吸数の増加と乾物摂取量および乳量の低下を抑制できる。
 - (2) 冷風機を組み込み、細霧に加えて冷気を送風すると体温と呼吸数の増加をさらに抑制できる。
 - (3) 稼働日の判定は、15時のTHI（温湿度指数）が77以上と予測される日とするとよい。
- 2 システム稼働の条件をTHI77以上を示す日とすると、THI77以上を示す年間日数が24日～69日の地域は細霧のみの送風をおこない、70日以上を示す地域は、細霧に加えて冷気の送風を4頭に1頭の割合で併用すると、乳量の低下抑制が試算した経済的な効果が期待できる。

キーワード：寒冷地域、タイストール乳牛舎、トンネル換気、細霧、冷風機、暑熱対策

地球温暖化により夏期の猛暑日の増加が予測され、暑熱に弱い乳牛の生乳生産量の減少が想定されている。このため特に気密性が高い寒冷地域の乳牛舎における暑熱対策の確立が急務である。一方、現在長野県内の酪農家において増加している暑熱対策法にトンネル換気法があげられる。この方法は天井が低く気密性が高い牛舎に有効な暑熱対策法である。

そこで、トンネル換気下のタイストール乳牛舎に設置することができる新たな暑熱対策強化システムを開発し、その効果を明らかにしたので概要を報告する。

方法

1 細霧送風システムの概要

本システムの牛体冷却機能は、以下の3点である（図1）。

- ①細霧装置とダクト送風を用いた牛体への細霧の吹付けと乾燥（牛体の気化冷却）
- ②トンネル換気による牛体からの気化熱および呼吸等の排出による牛舎内の湿度の上昇抑制
- ③オプションとして特に暑熱に弱い高齢牛向けの牛頭部へ冷気の送風である。

ダクトファン (0.75kw, 200V) による送風は、ダクト (PE、直径 550mm) の中心を牛の肩峰より後方約 20cm とし、牛の背部の上方に風穴 (直径約 55mm) を肩と背部へ向けて2か所開ける。この場合の1頭あたりの風量は約 9 m³/分、風穴直下の風速は約 20m/s となる。なお、ダクトの牛床からの高さは約 185cm である。

細霧送風装置は、ミストサイズ約 29 μ m のノズルを用い、動力噴霧機 (100V, 300w, 出力 2.5Mpa) にて1頭あたり約 50ml/分の水を噴霧できる構造とする。なお、噴霧時間はタイマー制御による6分間稼働、2分間停止の間欠運転をおこなう。

細霧用のノズル位置はトンネル換気の風向の違いにより考慮する必要がある。頭部から尾部へ向けての横断換気牛は牛床から高さ約 2m、間せん棒から飼槽側へ約 30cm に設置し、牛の肩～背に向けて噴霧する。また、尾部から頭部への横断換気牛は牛床から高さ約 2m、間せん棒から尿溝側へ約 115cm に設置し、牛の背～肩に向けて噴霧する。細霧を起立時および横臥時においても的確に牛の肩～背に噴霧するために、塩ビ管 (内径 50mm) をダクトから分岐させた細霧送風管を用いて、ノズルの前方または後方から牛の肩～背に向けて送風して細霧の吹付けをおこなう。ピンポイントで噴霧することで細霧の周囲への飛散を防ぎ、牛床を濡らさずに稼働できる。また、ポリダクトに牛の肩と背に向けて送風できるように直径

約 50mm の穴を前後に2ヵ所開け、強力な送風により細霧で濡れた体表を速やかに乾燥させ、牛体の気化冷却が可能である (図2、写真1)。

2 冷風機の概要

冷風機は、ラジエータ (軽自動車用 36cm×35cm・中古品) の冷却水 (流量 1.5L/分) に約 20℃の井戸水または水道水を用い、ラジエータ用電動ファンを介してラジエータの冷気を送風できる。

この装置は牛群内の全ての牛に設置するのではなく、特に牛群内で暑熱に弱い高泌乳牛や高齢牛に必要に応じて細霧送風システムに追加して設置する。冷風機を4頭に1台設置すると1台の冷風機に使用した冷却水を回収して貯水槽に溜めて、これを4頭分の飲用水と細霧用水として利用することができる。このように冷却水を循環利用することで排水を大幅に減らすことができ、水道代の節減が可能となる (写真2)。

しかし、冷風機の設置は、トンネル換気の風向、風速および牛舎構造を考慮する必要がある。牛の頭部に冷気を送風できる牛床に限られる。したがって、トンネル換気装置は牛舎を横断する風向きとし、牛の頭部から尾部へ向けて1～2m/sの風速を確保することが望ましい。なお、冷風機を設置しないで細霧送風装置のみを設置する場合は、細霧送風装置用の貯水槽を設置する必要がある。

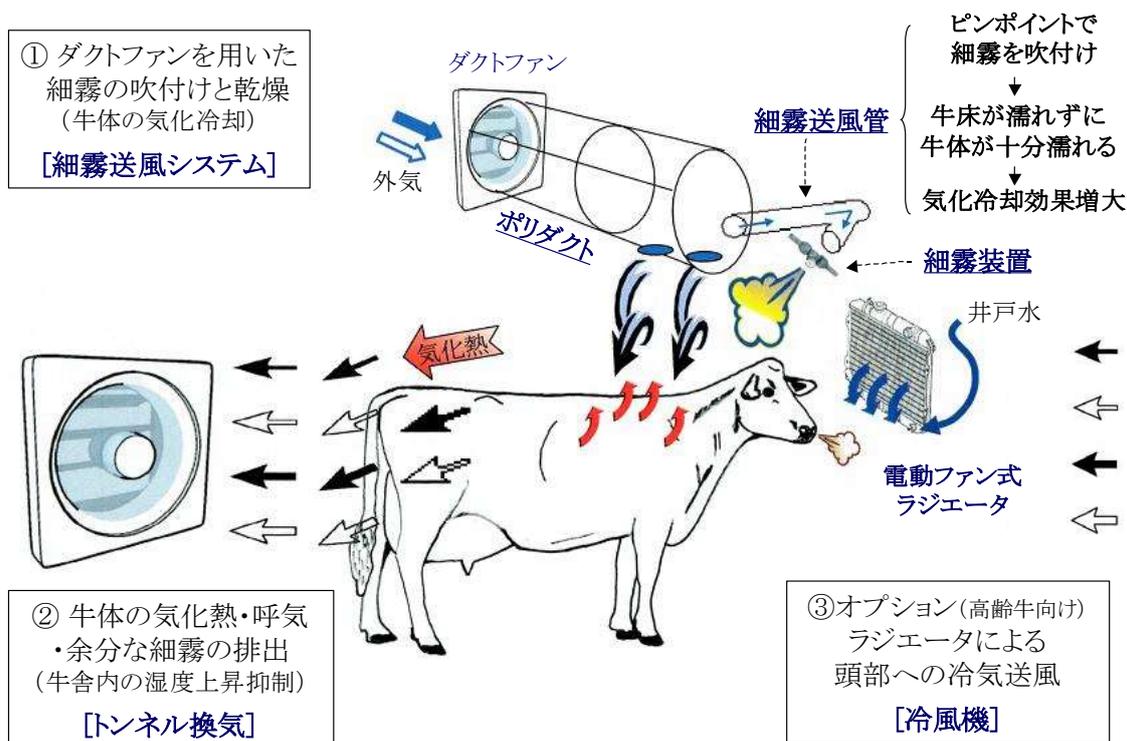


図1 細霧送風システムの牛体冷却機能の概要

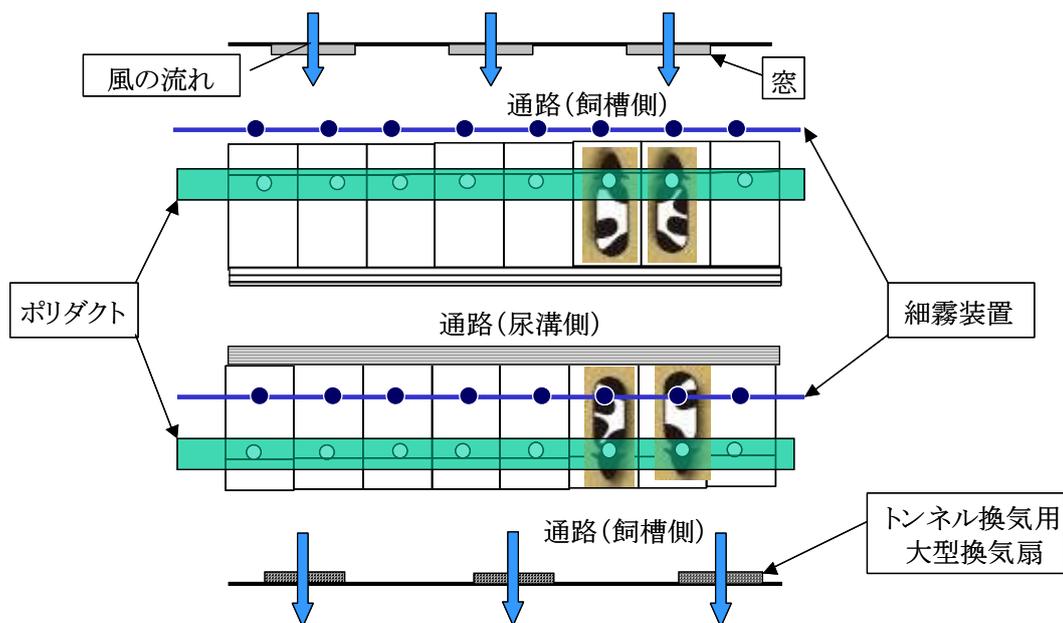


図2 対尻式タイストール乳牛舎における細霧装置とポリダクトの配置図

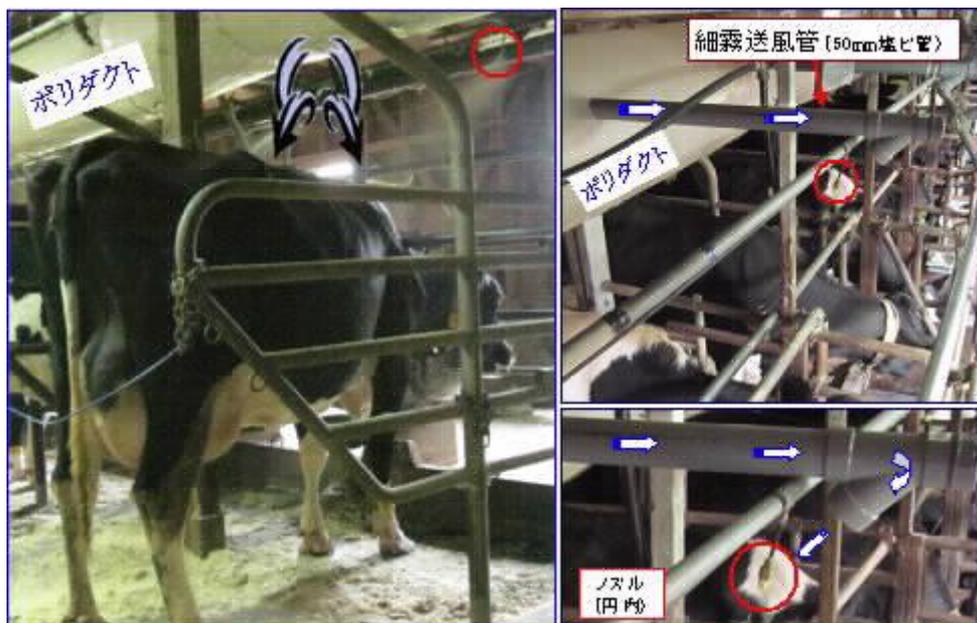


写真1 細霧送風システム

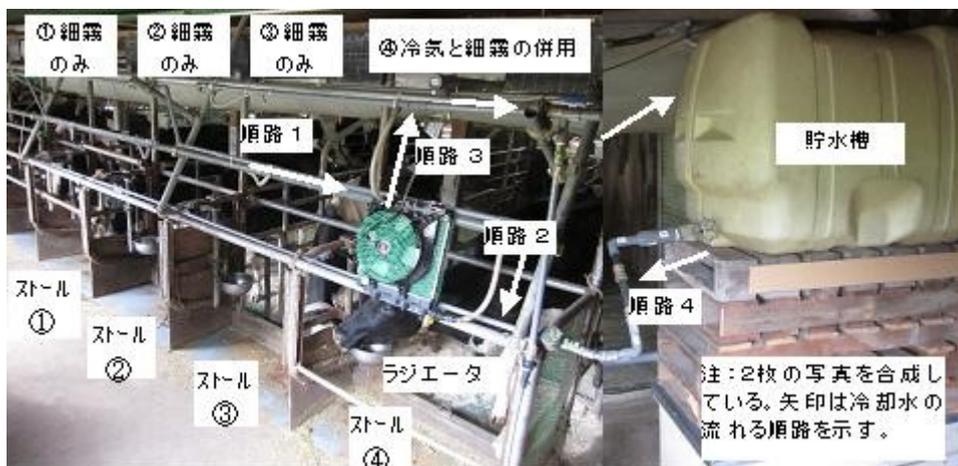


写真2 冷風機（4頭に1台の割合で冷風機を設置し排水を飲水利用したタイプ）

3 調査方法

(1) 暑熱対策装置の稼動時間

この試験に用いた暑熱対策装置の稼動時間は、トンネル換気装置は24時間運転、ダクトファンは8時～21時、細霧送風装置と冷風機は11時～17時とした。また、細霧用ポンプの作動は6分間噴霧、2分間停止を繰り返す間欠運転とした。

(2) トンネル換気に加えたダクトファンの送風効果

供試牛は泌乳最盛期を過ぎた日乳量33～43kgの2産以上の搾乳牛を用いた。試験区の区分は、トンネル換気のみとした対照区(ダクト無区)とトンネル換気下においてダクトファンの送風をおこなった試験区(ダクト有区)とし、搾乳牛8頭を各4頭ずつ割り付け、I期2週間(馴致期間9日間、本試験期間5日間)の反転法でおこなった(平成24年7月13日～8月23日)。

調査項目は乾物摂取量、乳量、体温、呼吸数および牛舎内の温度と湿度とした。なお、体温と呼吸数は午後3時に測定した(表1)。

表1 トンネル換気に加えたダクトファンの送風試験の試験配置および試験期間(平成24年)

期間	I期		II期		III期	
	馴致期間	本試験	馴致期間	本試験	馴致期間	本試験
	7月13日 から 7月21日	7月22日 から 7月26日	7月27日 から 8月4日	8月5日 から 8月9日	8月10日 から 8月18日	8月19日 から 8月23日
平均THI*	72.3	71.5	73.8	71.1	72.2	72.7
平均温度	24.6	24.0	26.5	24.2	24.5	25.8
平均日最高THI	75.8	74.3	78.1	75.7	76.0	76.5
平均日最高温度	28.4	26.6	31.9	29.3	28.7	30.3
A群	ダクト無		ダクト有		ダクト無	
B群	ダクト有		ダクト無		ダクト有	

※THI(温湿度指数)=0.8×温度+(相対湿度/100)×(温度-14.4)+46.4

(3) 細霧の送風が生乳生産に及ぼす影響

供試牛は2～5産の泌乳中後期の搾乳牛12頭(日乳量30～44kg)を用いた。試験区の区分は、細霧の送風をおこなわずトンネル換気のみとした対照区、トンネル換気下において細霧のみの送風をおこなった細霧区および細霧区の環境において夜間給餌をおこなった夜間区の3区とし、各々4頭ずつ割り付けた。なお、対照区と細霧区の飼料給与時間は乾草を8時、11時、17時30分、TMRを9時30分、13時30分、18時30分とし、夜間区は乾草を8時、

17時30分、19時、TMRを9時30分、18時30分、23時とした。

試験は梅雨明け日からシステムの稼動と夜間給餌をおこなった。試験前(梅雨明け前)の調査期間を1週間(平成27年7月14日～20日)とし、本試験期間を梅雨明け後4週間(平成27年7月21日～8月17日)とした。また、試験前の成績を100として本試験期間の成績と比較した。

調査項目は乾物摂取量、乳量、乳成分、体温、呼吸数および牛舎内の温度と湿度とした。なお、体温と呼吸数は午後3時に測定した。

(4) 冷風機の性能調査

ア ラジエータの流量と冷気温度の関係

冷風機の冷風温度が最低となるラジエータの最小流量を調査するため、冷風機に井戸水(約20℃)を循環させて、その流量を段階的に増やして冷風温度の変化を調査した。

イ 冷却性能調査

冷風機の稼動時の牛頭部位位置(飼槽から高さ約

120cm)および牛舎内(飼槽から高さ約210cm)の温度と湿度を自記温湿度記録計により1時間間隔で24時間測定した。

(5) 冷気と細霧を併用した送風が体温と呼吸数に及ぼす影響

ア 冷気・細霧区と細霧区および対照区の比較

冷気と細霧を併用した区(冷気・細霧区)と細霧のみ区(細霧区)およびトンネル換気のみ区(対照区)の暑熱対策効果を比較するために、搾乳牛6頭を2頭ずつ3グループに割り付け、連続する3日

間に1日毎に区を変えてラテン方各法により調査した。また、連続する3日間は午後3時のTHIが74以上75未満、75以上77未満および77以上80未満を示した3期に分けた（調査期間：平成26年7月21日～8月13日）。なお、THI値を算出するために牛舎内の温度と湿度は自記温湿度記録計により1時間間隔で測定した。

供試牛は3～6産の泌乳中後期牛（日乳量37～46kg）を用い、午後3時の体温（直腸内温度）と呼吸数を調査した。

イ 冷気・細霧区と細霧区の比較

冷気と細霧の併用した区（冷気・細霧区）と細霧のみ区（細霧区）の暑熱対策効果の差を比較するために、搾乳牛4頭を2頭ずつ2グループに割り付け、連続する3日間に1日毎に区を反転して調査した。また、連続する3日間は午後3時のTHIが74以上76未満、76以上77未満および77以上79未満を示した3期に分けた（調査期間：平成26年7月14日～8月21日）。

供試牛は2～4産の泌乳中後期の搾乳牛4頭（日乳量36～43kg）を用い、午後3時の体温と呼吸数を調査した。

(6) 冷気と細霧を併用した送風が生乳生産に及ぼす影響

供試牛は2～6産の泌乳中後期の搾乳牛6頭（日乳量30～42kg）を用いた。試験の区分は、冷気と細霧を併用した試験区とトンネル換気のみ環境の対照区に5頭ずつ割り付けた。

試験は梅雨明け日からシステムを稼働させておこなった。試験前（梅雨明け前）の調査期間を1週間（平成25年7月19日～25日）とし、本試験期間を梅雨明け後4週間（平成25年7月26日～8月22日）とした。また、試験前の成績を100として本試験期間の成績と比較した。

調査項目は細霧送風システムが生乳生産に及ぼす影響の調査と同様とした。

(7) 細霧送風システムの稼働判定のための気象条件の調査

細霧のみ送風時および冷気と細霧併用時の稼働判定のための気象条件を明らかにするため、体温上昇の抑制効果の有無を従属変数、THIを説明変数としたロジスティック回帰分析をおこなった。分析は細霧の送風が生乳生産に及ぼす影響と冷気と細霧の併用が生乳生産に及ぼす影響を調査した試験成績を用いた。各々の試験区の体温（午後3時）が対照

区に比較して有意に低い日のTHI（午後3時）をシステムの稼働により体温上昇の抑制効果が認められたTHIと判定した。

細霧のみ送風時の調査は平成27年7月21日～8月26日までの37日間、冷気と細霧併用時の調査は平成25年7月19日～8月29日までの内の36日間おこなった。

(8) システムの稼働が敷料の水分含量に及ぼす影響

細霧送風により牛床が濡れていないかを調査するために、冷気と細霧送風時（冷気・細霧区）、細霧のみ送風時（細霧区）およびトンネル換気のみ（対照区）の環境の3区についてシステム稼働前（10時）とシステム停止後（17時）の敷料（オガクズ）の水分含量を測定した。なお、システム稼働前に敷料を交換し、各区2ストールから5日間（平成26年7月31日、8月3日、8日、12日、17日）採材した。

(9) 細霧送風システムの費用便益分析

細霧送風システムの経済性の評価をおこなうために、費用と便益の分析を下記の式を用いて純便益を算出した。なお、システムのタイプを冷風機の利用割合、冷却水の水源および飲水利用の有無により分類して算出した。また、システムの稼働日数の違いについても検討をおこなった。

$$\text{純便益} = \text{頭数} \times \text{稼働日数} \times \left\{ \begin{array}{l} \text{乳量低下抑制量} \times \text{乳価} - \\ \left[\begin{array}{l} \text{乾物摂取量} \times \text{飼料価格} + \text{電気料金} + \text{水道料金} \\ \text{低下抑制量} \end{array} \right] \end{array} \right\} - \text{年間償却費}$$

結果

1 トンネル換気に加えたダクトファンの送風効果

乾物摂取量と乳量はダクト無区とダクト有区に差は認められなかった。一方、体温はダクト無区に比較してダクト有区において低く、また呼吸数はダクト無区に比較してダクト有区において少なく、ダクトファンによる送風の効果がみられた（表2）。

2 細霧の送風が生乳生産に及ぼす影響

試験前を100とした場合の4週間に互る各生産性の指標値の増減をみると、細霧区は対照区に比較して乾物摂取量が5%、乳量が6%、標準乳量が5%

表2 トンネル換気に加えたダクトファンの送風効果（平成24年）

	ダクト有	ダクト無
乾物摂取量 (kg/日)	22.5	22.4
乳量 (kg/日)	36.3	36.2
体温 (°C)	38.9a	39.1b
呼吸数 (回/分)	51.8a	57.2b

異符号間に有意差あり (ab: p<0.05)

表3 細霧の送風が生乳生産に及ぼす影響

(平成27年)

	試験前 7月14日 ~7月20日	1週 7月21日 ~7月27日	2週 7月28日 ~8月3日	3週 8月4日 ~8月10日	4週 8月11日 ~8月17日	平均 (1~4週)	
平均THI ¹⁾	72.5	73.9	75.6	74.6	72.4	74.1	
平均温度	24.3	25.6	26.4	26.2	24.0	25.6	
平均日最高THI	75.9	78.1	80.5	79.6	76.3	78.6	
平均日最高温度	27.7	30.1	31.9	31.8	28.0	30.4	
乾物 摂取量 (kg)	26.0 100	25.8 99	24.7 95	23.9 92	24.2 93	24.7 95	* **
対照区 ²⁾	24.4 100	24.5 101	24.1 99	24.3 100	24.3 100	24.3 100	
細霧区 ³⁾	25.1 100	25.2 101	25.8 103	25.9 103	25.9 103	25.7 102	
細霧夜間区 ⁴⁾							
乳量 (kg)	35.8 100	35.1 98	31.9 90	30.7 86	31.1 87	32.2 90	* **
対照区	37.9 100	37.6 99	36.4 96	35.6 94	36.1 95	36.4 96	
細霧区	39.0 100	38.7 99	38.9 100	37.6 96	38.0 97	38.3 98	
標準 ⁵⁾ 乳量 (kg)	37.8 100	37.8 99	35.1 93	34.4 91	35.3 93	35.6 94	* **
対照区	38.9 100	39.1 100	38.5 99	38.1 98	39.2 101	38.7 99	
細霧区	37.3 100	37.6 101	38.4 103	37.6 101	38.7 104	38.1 102	
体温 (°C)	38.8 100	39.1 101	39.8 103	39.5 102	38.9 100	39.3 101.3	** **
対照区	38.8 100	38.8 100	39.1 101	38.8 100	38.6 100	38.9 100.1	
細霧区	38.8 100	38.7 100	38.9 100	38.9 100	38.7 100	38.8 99.9	
呼吸数 (回/分)	46.1 100	58.3 126	79.6 172	73.3 159	51.1 111	65.6 142	** **
対照区	43.5 100	41.2 95	48.2 111	42.9 99	34.5 80	41.7 96	
細霧区	43.0 100	42.4 99	54.4 127	52.9 124	42.3 99	48.0 112	
乳脂率 (%)	4.0 100	3.9 97	3.8 96	3.8 96	3.9 98	3.9 97	
対照区	4.0 100	3.9 97	3.7 92	4.0 100	3.7 94	3.8 96	
細霧区	3.7 100	3.5 96	3.6 99	3.7 102	3.8 104	3.7 100	
細霧夜間区							
乳蛋 白率 (%)	3.4 100	3.3 97	3.2 96	3.2 96	3.3 97	3.2 96	
対照区	3.1 100	3.1 100	3.0 98	3.1 101	3.1 101	3.1 100	
細霧区	2.9 100	3.0 102	2.9 100	3.0 100	3.0 102	3.0 101	
細霧夜間区							
MUN (mg/dl)	12.8 100	12.5 98	12.4 98	12.5 98	9.5 74	11.7 92	
対照区	12.5 100	12.4 100	12.2 97	12.5 100	8.3 67	11.4 91	
細霧区	12.1 100	12.0 99	12.1 100	12.2 101	11.5 95	12.0 99	
細霧夜間区							

1) THI(温湿度指数)=(0.8×気温+(相对湿度/100)×(気温-14.4))+46.4

2)トンネル換気のみ、3)トンネル換気下の細霧送風、4)トンネル換気下の細霧送風と夜間給餌

5)産次数を2産、分娩後日数を120日、分娩季節を春に補正した乳量

各項目値の上段は実測値、下段は試験前を100%とした場合の増減率を示す。*:p<0.05,**:p<0.01

の有意な低下の抑制が、体温が1.2%、呼吸数が46%の有意な増加の抑制がみられた。また、夜間区は対照区に比較して乾物摂取量、乳量および標準乳量に有意な低下の抑制が、体温と呼吸数に有意な増加の抑制がみられた。しかし、夜間区は細霧区に比較して乾物摂取量、乳量および標準乳量の低下が抑制される傾向はみられたが有意な差ではなかった(表3)。

3 冷風機の性能調査

(1) ラジエータの流水量と冷気温度の関係

ラジエータの流水量を増加すると冷風温度の低下がみられる。冷却水温度19℃、THI76環境下においてラジエータの流水量の増加にともない冷風温度は約23℃まで低下がみられた。流水量の増加にともなう冷風温度の低下の割合をみると、流水量が1.5L/分未満における冷風温度の変化は大きい、流水量が1.5L/分以上においては冷風温度の変化は極めて少なくなった。このことからラジエータの流水量を1.5L/分に設定すると最小の流水量で最低の冷風温度が得られるものと考えられた(図3)。

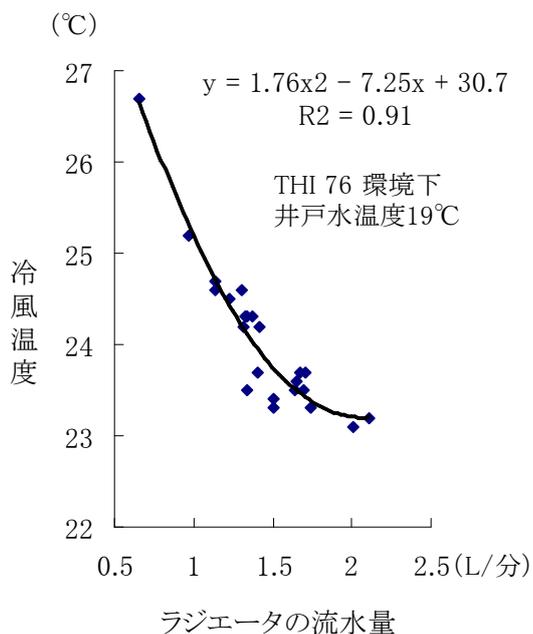


図3 ラジエータの流水量と冷気温度の関係

(2) 冷却機能調査

冷風機停止時の牛舎内と牛頭部位置の温度とTHIは大きな差はみられないが、10時に牛舎内のTHIが76を超え、11時から冷風機を稼働させると牛頭部位置の温度とTHIの低下がみられた。牛

頭部位置の温度とTHIは牛舎内と比較して温度は3.5~4.3℃、THIは2.8~4.0と低く推移した(図4)。

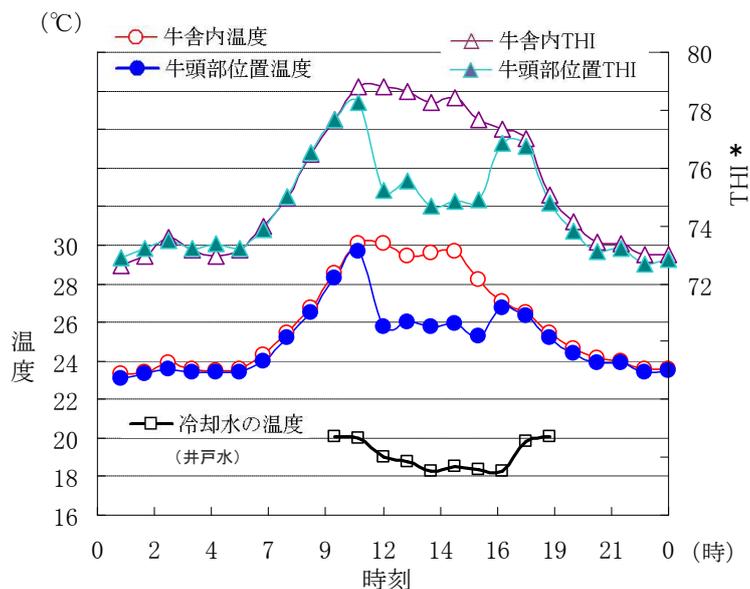
4 冷気と細霧を併用した送風が体温と呼吸数に及ぼす影響

(1) 冷気・細霧区と細霧区および対照区の比較

THIが74以上75未満においては3区間の体温と呼吸数に差がみられなかった。しかし、THIが75以上77未満においては冷気・細霧区と対照区の間、THIが77以上80未満においては冷気・細霧区と対照区および細霧区と対照区の間、体温と呼吸数に有意な差がみられた(表4)。このことからトンネル換気のみ環境下(対照区)に比較して細霧のみ送風時(細霧区)の体温と呼吸数の増加を抑制できる気象条件はTHI77以上と考えられた。また、冷気と細霧併用時(冷気・細霧区)はTHI75以上と考えられた。

(2) 冷気・細霧区と細霧区の比較

THIが74以上76未満においては両区の体温と呼



$$*THI(温湿度指数) = 0.8 \times \text{温度} + (\text{相対湿度}/100) \times (\text{温度} - 14.4) + 46.4$$

図4 冷気送風装置稼働にともなう牛頭部位置(起立時)の温度とTHIの変化

吸数に差がみられなかった。しかし、THIが76以上77未満においては両区の呼吸数に、THIが77以上78未満においては両区の体温と呼吸数に有意な差がみられた(表5)。このことからTHIが76~77以上

表4 細霧に加えた冷気の送風が体温と呼吸数に及ぼす影響

THI*	調査項目*	冷気・細霧区	細霧区	対照区
74以上75未満	体温(°C)	38.6	38.7	38.8
	呼吸数(回/分)	33.5	34.0	38.7
75以上77未満	体温(°C)	38.7 a	38.9	39.0 b
	呼吸数(回/分)	32.8 A	36.5	40.3 B
77以上80未満	体温(°C)	38.9 a	38.9 a	39.2 b
	呼吸数(回/分)	40.0 a	43.3 a	49.7 b

異符号間に有意差あり (ab:p<0.05, AB:p<0.01)

* 午後3時の測定値

THI(温湿度指数)=(0.8×温度+(相対湿度/100)×(温度-14.4))+46.4

表5 細霧に加えた冷気の送風が体温と呼吸数に及ぼす影響
(平成26年)

THI*	調査項目*	冷気・細霧区	細霧区
74以上76未満	体温(°C)	38.5	38.6
	呼吸数(回/分)	31.3	31.8
76以上77未満	体温(°C)	38.7	38.8
	呼吸数(回/分)	35.7 a	38.1 b
77以上79未満	体温(°C)	38.7 a	39.0 b
	呼吸数(回/分)	37.4 a	40.9 b

異符号間に有意差あり (ab:p<0.05)

* 午後3時の測定値

THI(温湿度指数)=(0.8×温度+(相対湿度/100)×(温度-14.4))+46.4

の気象条件において冷気と細霧を併用する効果がみられことが示唆された。

5 冷風と細霧を併用した送風が生乳生産に及ぼす影響

試験前を100とした場合の4週間に亙る各生産性の指標値の増減をみると、冷気・細霧区は対照区に比較して乾物摂取量が6%、乳量が6%、標準乳量が6%の有意な増加が、体温が0.8%の有意な減少がみられた(表6)。このことからトンネル換気に加えて冷気と細霧の送風を併用すると、暑熱による乳量の低下が抑制されると考えられた。

6 細霧送風システム稼動判定のための気象条件

細霧のみ送風時のTHIと搾乳牛の体温上昇抑制効果との関係はTHIが77.3で50%、80.5で90%、84.2で99%の確率で効果が期待できると推測され、THIが77を超えて増加するに従ってシステムの効果の発現が期待された(図5)。このことから概ね50%以上の確率で効果が期待できる気象条件をシステム稼動の条件とすると、また冷気と細霧を併用した送風が体温と呼吸数に及ぼす影響の成績(表5)とあ

わせて考えると、その目安はTHI77以上と考えられた。

同様に、冷風と細霧併用時のTHIと搾乳牛の体温上昇抑制効果との関係はTHIが76.1で50%、78.1で90%、80.5で99%の確率で効果が期待できると推測され、THIが76を超えて増加するに従ってシステムの効果の発現が期待された(図6)。このことから概ね50%以上の確率で効果が期待できる気象条件をシステム稼動の条件とすると、その目安はTHI76以上と考えられた。

7 細霧送風システムの稼動が敷料の水分含量に及ぼす影響

システム稼動前に敷料を全て交換したために各区のシステム稼動前の敷料は同様であった。システム稼動後の敷料の水分は3.0~4.7%の増加がみられ、稼動前後における敷料の水分含量の違いに各区に有意な差はみられなかった(表7)。このことから細霧送風システムは牛床を濡らさずに稼動しているものと考えられた。

表6 冷気と細霧を併用した送風が生乳生産に及ぼす影響

(平成25年)

		試験前 7月19日 ～7月25日	1週 7月26日 ～8月1日	2週 8月2日 ～8月8日	3週 8月9日 ～8月15日	4週 8月16日 ～8月22日	平均 (1～4週)
平均THI ¹⁾		72.0	73.0	73.1	75.5	75.3	74.2
平均気温		24.0	24.3	24.2	26.7	26.3	25.4
平均日最高THI		76.6	76.8	77.6	80.7	79.2	78.6
平均日最高気温		28.3	28.1	28.5	32.6	30.9	30.0
乾物 摂取量 (kg)	対照区 ²⁾	25.6 100	25.3 99	25.2 98	23.3 91	22.1 86	24.0 94
	冷気・細霧区 ³⁾	25.5 100	25.6 100	25.6 101	25.5 100	25.2 99	25.5 100
乳量 (kg)	対照区	37.4 100	36.1 96	35.0 94	33.4 89	32.5 87	34.2 91
	冷気・細霧区	35.7 100	35.5 100	34.5 97	34.2 96	34.2 96	34.6 97
標準 ⁴⁾ 乳量 (kg)	対照区	38.8 100	38.0 98	37.5 97	36.3 93	35.9 92	36.9 95
	冷気・細霧区	40.1 100	40.6 101	40.1 100	40.3 100	40.9 102	40.5 101
体温 (°C)	対照区	38.9 100	39.1 101	39.2 101	39.9 103	39.4 101	39.4 101.4
	冷気・細霧区	38.7 100	38.7 100	38.7 100	39.2 101	38.9 101	38.9 100.6
呼吸数 (回/分)	対照区	55.9 100	56.0 101	60.1 108	78.9 143	68.2 123	65.8 119
	冷気・細霧区	46.3 100	42.5 92	48.6 105	65.4 142	55.5 120	53.0 115
乳脂率 (%)	対照区	4.3 100	4.0 91	4.2 96	4.1 95	4.0 92	4.1 94
	冷気・細霧区	3.7 100	3.6 98	3.7 99	3.6 97	3.7 99	3.7 98
乳蛋 白率 (%)	対照区	3.1 100	3.1 101	3.2 104	3.2 102	3.1 101	3.2 102
	冷気・細霧区	3.2 100	3.2 98	3.3 103	3.3 102	3.4 104	3.3 102
MUN (mg/dl)	対照区	12.8 100	11.3 89	13.6 107	15.1 119	13.6 108	13.4 106
	冷気・細霧区	12.5 100	11.2 90	12.7 101	13.2 106	12.3 98	12.3 99

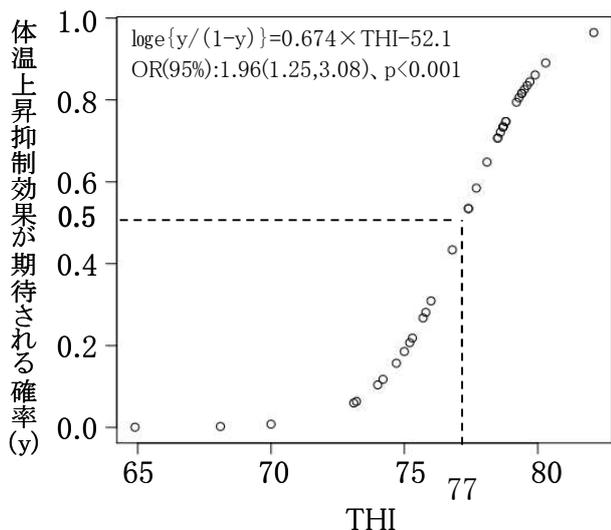


図5 細霧のみ送風時の THI と 体温上昇抑制効果が期待される確率 (平成 27 年)

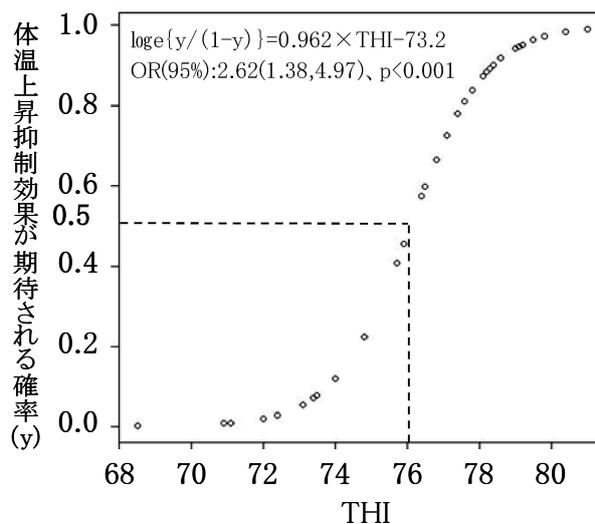


図6 冷気と細霧送風併用時の THI と 体温上昇抑制効果が期待される確率 (平成 25 年)

表 7 細霧送風システムの稼動が敷料 (オガクズ) の水分含量に及ぼす影響

(平成 26 年) (%)

	冷気・細霧区	細霧区	対照区	差の有意性
稼動前(10時) [※]	10.9±1.6	10.9±1.6	10.7±1.6	
停止後(17時) [※]	15.4±2.2	15.6±3.1	13.8±2.4	
差	4.4±1.3	4.7±2.6	3.0±1.5	ns

※システム稼動前に敷料を交換し、各区2ストールから5日間採材した。
ns: 各区に有意差なし。

8 細霧送風システムの費用便益分析

システムのタイプを細霧のみ送風するタイプ (細霧のみ)、冷風機の冷却水に井戸水を用いて全頭に冷気と細霧送風を併用するタイプ (井戸・全頭型)、冷風機の冷却水に井戸水を用いて4頭に1頭の割合で冷気と細霧送風を併用するタイプ (井戸・1/4型)、冷風機の冷却水に水道水を用いて4頭に1頭の割合で冷気と細霧送風を併用し冷却水の排水を飲水に再利用するタイプ (水道循環・1/4型) に分けて分析した。

細霧のみ送風時の乳量と乾物摂取量の低下抑制割合は試験成績 (表4、7) からいずれも5%、冷気と細霧送風併用時はいずれも6%と推定した。これらの抑制割合から1日1頭当たりの乳量と乾物摂取量の低下抑制量を算出したところ、細霧のみ送風時

乳量は1.8kg/頭・日、乾物摂取量は1.3kg/頭・日と推定された。また、冷気と細霧送風併用時の乳量は2.2kg/頭・日、乾物摂取量は1.5kg/頭・日と推定され、4頭に1頭の割合で冷気と細霧送風を併用した場合は乳量が1.9kg/頭・日、乾物摂取量が1.3kg/頭・日と推定された。その他の便益を計算する上での変動要因の値は表8に示したとおりである。

なお、システム稼動の条件は THI77 以上を示す日とし、純便益1はシステムの稼動日数を50日、純便益2は稼動日数を70日として算出した。稼動日数の50日と70日は、松本市における THI77 以上を示した年間日数の過去10年間の平均値と最大値を用い、平年の暑さの年と猛暑の年との2つのモデルケースを想定して算出した。

表8 タイストール乳牛舎（1列16頭規模）における細霧送風システムの費用便益分析

要因	数量(生産量・消費量等)			
	細霧のみ	冷気・細霧併用		
	水道水	井戸水	井戸水	水道水
水源		全頭	4分の1頭利用	4分の1頭利用
冷風機数	-		排水	排水利用
冷却水	-	井戸・全頭型	井戸・1/4型	水道循環・1/4型
乳量低下の抑制量 ¹⁾ {乳価(7~8月):109.3円/kg}	1.8kg/頭・日	2.2kg/頭・日	1.9kg/頭・日	} 同左
乾物摂取量低下の抑制量 ¹⁾ (飼料価格:71.8円/DMkg)	1.3kg/頭・日	1.5kg/頭・日	1.3kg/頭・日	
電気使用量 ・単相100V(25円/kWh)	0.15kWh/頭・日	0.72kWh/頭・日	0.29kWh/頭・日	
・3相200V(15円/kWh)	0.6kWh/頭・日	同左	} 同左	
水道使用量(0.23円/L)	18L/頭・日	0L/頭・日		3L/頭・日
装置の価格 (耐用年数:7年,利率:1.15%/年)	13,798 円/頭	26,710 円/頭	19,134 円/頭	24,407 円/頭
装置の価格(16頭分)	220,762 円	427,356 円	306,150 円	390,504 円
内訳	細霧装置	154,302	154,302	154,302
	冷気装置	0	206,594	85,388
	送風装置	66,460	66,460	66,460
	貯水槽	0	0	0
純便益 ²⁾ 1(稼働日数:50日 ³⁾)	36,203 円	20,717 円	32,693 円	19,530 円
純便益 ²⁾ 2(稼働日数:70日 ⁴⁾)	63,886 円	54,560 円	64,079 円	50,695 円

- 1) 細霧のみの場合の減少抑制割合:乳量5%、乾物摂取量5%(平成27年試験成績より推定)
冷気と細霧を併用した場合の減少抑制割合:乳量6%、乾物摂取量6%(平成25年試験成績より推定)

2) 純便益 = 頭数 × 稼働日数 × { 乳量低下抑制量 × 乳価 - [乾物摂取量低下抑制量 × 飼料価格 + 電気料金 + 水道料金] } - 年間償却費

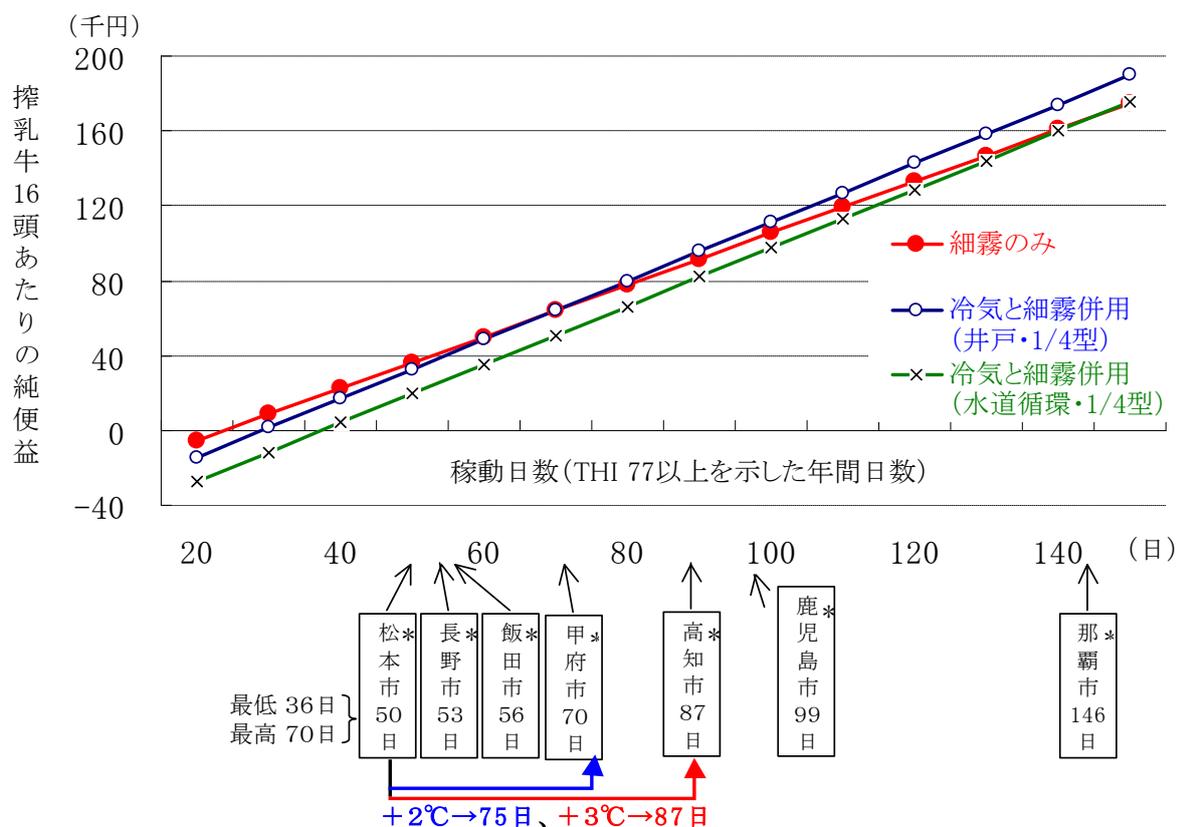
- 3) 松本市における THI77 以上を示した年間日数の過去 10 年間の平均値(平成 18~27 年、気象庁の観測値より作成)
4) 松本市における THI77 以上を示した年間日数の過去 10 年間の最大値(平成 18~27 年、気象庁の観測値より作成)

純便益 1 は細霧のみのタイプが最も高く、冷気と細霧を併用する場合の投資効果を上回った。一方、純便益 2 は井戸・1/4 型が最も高くなり、冷気と細霧を併用する経済効果がみられた。しかし、井戸・全頭型と水道循環・1/4 型は償却費が高いため、稼働日数が 70 日以下の気象条件では投資効果がみられなかった(表 9)。

次に、システムのタイプ別に稼働日数と純便益との関係を算出し、気象条件に応じたシステムの経済的な利用方法について検討した。

細霧のみの純便益は稼働日数が 24 日以上になるとプラスの評価となった。井戸・1/4 型の純便益が細霧のみの純便益を上回る稼働日数は 70 日であった。また、水道循環・1/4 型の純便益が細霧のみの純便益を上回る稼働日数は 150 日であった。

過去 10 年間の気象データ(気象庁:平成 18 年~27 年)から観測地点毎に THI77 以上を示した年間日数を調査したところ、70 日の地点は甲府市が該当した。また、気象庁の予測(地球温暖化予測情報第 8 巻:平成 25 年)では、21 世紀末の日本の年平均気温は 20 世紀末と比較して 2~3℃程度の上昇がみられることが示されている。この予測をもとに過去 10 年間の松本市の気温に 2℃を加えて湿度に変化はないものとの条件で THI77 以上を示した年間日数の平均値を算出したところ 75 日となり、将来の松本市は現在の甲府市以上に暑くなることが予測された。



*各観測地点におけるTHI77以上を示した年間の稼働日数の過去10年間の平均値 (平成18年~27年、気象庁の観測値から作成)

図7 細霧送風システムの稼働日数と純便益との関係

考察

トンネル換気は乳牛の暑熱対策として有効な方法である。長野県など寒冷地域の牛舎は気密性が高く天井が低い構造が多いため、温暖な地域でみられるような天井から吊り下げた大型送風機を利用したリレー式送風法をおこなうことが困難である。そのため寒冷地域におけるタイストール乳牛舎の暑熱対策としてトンネル換気を設置する事例が増加している。しかしながら地球温暖化にともない夏期の気温の上昇がみられ、トンネル換気に加えた新たな暑熱対策強化法の開発が求められている。

これまでトンネル換気下において牛体への送風または散水をおこなうと暑熱対策効果が向上することが示されている。このことからトンネル換気に加えてダクトファンによる牛体への送風を行った。

しかし、体温と呼吸数の増加抑制効果はみられたが、乾物摂取量と乳量の低下抑制効果を明らかにできなかった。そこでさらにトンネル換気下の暑熱対策を強化するため、ダクトファンの送風に加えて細霧および冷気の送風をおこない、これらの強化対策により乳量と乾物摂取量の低下を抑制できることが明らかとなった。

また、タイストール乳牛舎におけるこれまでの細霧装置の利用上の課題は、細霧が広範囲に飛散し牛床が濡れることで乳頭周囲が不衛生な状態になり乳房炎のリスクが増大することである。このことを解決するため、本システムはポリダクトから細霧送風管を分岐させ、牛の上方から背～肩に向けて細霧をピンポイントに吹き付けた。これによりシステムの稼働前と停止後の敷料の水分含量に差がみられず、本システムは牛床を濡らさずに稼働できることが明らかになった。これらのことから本システムは

長野県等寒冷地域特有の天井が低く気密性の高いトンネル換気下のタイストール乳牛舎に適した暑熱対策強化システムと考えられた。

将来、自動運転等 ICT 化に向けてシステムの稼働の判定基準を数値で示す必要がある。気象条件と乳牛の暑熱ストレス強度の関係は温湿度指数 (THI) を用いて示されている。しかしながら、これまで乳牛の細霧装置における稼働の判定基準を示した報告はみあたらない。そこで対照区 (トンネル換気のみ) と細霧区 (トンネル換気下でダクトファンと細霧の送風) の体温に有意差がみられる確率と THI との関係性を明らかにした。50%以上の確率で体温上昇抑制効果が期待できる気象条件をシステム稼働の条件と考えるとその THI は 77 以上であった。また、体温と呼吸数を冷気・細霧区 (トンネル換気下でダクトファン及び冷気と細霧の送風) と細霧区および対照区間で比較した試験成績においても THI77 以上で対照区と冷気・細霧区及び対照区と細霧区間に有意な差がみられた。

乳牛は THI68 以上になると暑熱ストレスを受けることが示されている。これらのことから本システムの稼働方法は THI68 以上でトンネル換気とダクトファンによる送風をおこない、THI77 以上でトンネル換気とダクトファンの送風に加えて細霧の送風をおこなうことがよいと考えられた。

長野県は南北に長くかつ標高差があるため、夏期の THI の地域差が比較的大きい。そのため各地域において酪農家が細霧装置及び冷風機の導入を判断するための目安が必要である。暑熱ストレスが乳牛の生産性に及ぼす影響は乾物摂取量と乳量の低下、斃死牛と廃用牛頭数の増加及び繁殖成績の低下が報告されている。しかし、斃死牛と廃用牛頭数の増加と繁殖成績の低下の割合は予測が困難である。そこで便益の見積額が小さくなりシステムの効果が過小評価となるが、乾物摂取量と乳量の低下の抑制割合のみを指標として費用便益分析をおこなった。この分析値から本システムの年間の稼働日数が 24 日以上になると細霧の送風の経済効果がみられ、稼働日数が 70 日以上になると冷気と細霧を併用 (4 頭に 1 頭の割合で冷風機を設置) する経済効果がみられることが推定された。このことから THI77 を示す年間の日数 (稼働日数) が 24 日以上 70 日未満の地域においては細霧装置の導入をおこない、70 日以上地域において冷風機の導入をおこなうことがよいと考えられた。

しかしながら長野市 (北部)、松本市 (中部) 及び飯田市 (南部) の THI77 以上を示した年間の日数の

過去 10 年間の平均値は、何れの地点においても 70 日未満である。このことから長野県における現在の温暖化レベルでは、トンネル換気とダクトファンの送風に加えて細霧の送風をおこなえばよいと考えられた。

今後、地球温暖化にともない長野県においても THI77 以上を示す年間日数が 70 日以上を示すことが予測される。将来、システムの年間の稼働日数が 70 日を越えた時点で、井戸水の利用が可能な酪農家において特に高齢牛等暑熱に弱い牛向けに冷風機の導入 (システムに冷風機を組み込み細霧に加えて冷気の送風を 4 頭に 1 頭の割合で併用する) を検討するとよいと考えられた。

引用文献

- 1) Hisashi Nabenishi, Hiroshi Ohta, Toshihumi Nishimoto, Tetsuo Morita, Koji Shizawa, Yasuhiro Tsuzuki : Effect of the temperature-humidity index on body temperature and conception rate of lactating dairy cows in southwestern Japan, J Reprod Dev, 57, 450-456 (2011)
- 2) J. Bohmanova, I. Misztal, J. B. Cole
†. Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses due to Heat Stress. J. Dairy Sci. 2007. 90:1947-1956
- 3) J. W. West. 2003. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. J. Dairy Sci. 86:2131-2144
- 4) 気象庁. 2013. 地球温暖化予測情報. 第8巻. 1-2
- 5) 久米新一. 高泌乳牛の代謝と暑熱ストレスの影響. 2011. 畜産の研究. 65巻. 9号. 881-891
- 6) 鍋西久. 2012. 温湿度指数を用いた暑熱対策. 臨床獣医. Vol130. No7. 21-25
- 7) 長尾慶和. 2009. 繋ぎ牛舎におけるトンネル換気方式が夏季暑熱時の牛舎環境および牛体に及ぼす影響. 日本畜産学会報. 80(3). 349-367
- 8) 野中最子. 2009. 地球温暖化が日本における家畜の生産性に及ぼす影響評価の現状と課題. 地球環境. 14. 215-222
- 9) 阪谷美樹. 2015. 暑熱ストレスが産業動物の生産に与える影響. 産業動物臨床医誌. 5. 238-246
- 10) Smith TR. 2006. Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the southeast. J Dairy Sci. ;89(10) :3904-23
- 11) Zimbleman, R. B., and R. J. Collier. 2011. Heat hits cows sooner than we thought-They are affected at a THI of 68. Hoard's Dairyman. April, 25th 2011 issue.