



家畜改良から考える暑熱対策

—暑熱耐性の遺伝的能力評価を利用した改良—

独立行政法人 家畜改良センター 大澤 剛史

はじめに

日本において乳用牛の中で最も多く飼養されているホルスタイン種（乳用牛全体の98.5%、2025年11月時点、個体識別情報により集計）は、乳用牛の中で最も泌乳能力が高い一方、暑さ等の暑熱ストレスに弱い品種であることが知られています。図1は、気象庁が報告している3地域（北日本、東日本および西日本）における夏季（7～9月）の平均気温平年差（※平年値は1991-2020年の30年間の観測値の平均をもとに算出）の推移を示していますが、2022年以降は夏季の気温がいずれの地域においても平年よりも+1度以上高い年が続いていることからわかるように、近年の地球温暖化の影響により、乳用牛に対する暑熱ストレスによる乳量の低下や繁殖性の悪化等の影響が大きくなっています。酪農家ができる暑熱ストレス対策としては、牛舎の見直し（換気の改善、屋根への遮熱塗装、ミストやエアコンの設置等）による飼養環境の改善が、即効性が期待できる一方、設備投資やその設備の維持等の費用が掛かります。そこで、近年は遺伝的に暑熱ストレス耐性が強い牛群への改良が、一部の国で注目され

はじめています。まず、オーストラリアが2017年に暑熱耐性の遺伝的能力評価を世界で初めて開始し、日本はオーストラリアに次いで2021年8月に2番目に早く暑熱耐性の遺伝的能力評価を開始しました。その後、イタリアでも2022年4月に同様の遺伝的能力評価を開始しています。本章では、日本の暑熱耐性の遺伝的能力評価の方法や遺伝評価値の特徴等について解説します。

暑熱ストレスの指標は温湿度指数 (THI)

日本では、帯広畜産大学の萩谷研究室の研究成果を基にホルスタインの暑熱耐性の遺伝的能力評価を2021年8月から開始しました。暑熱耐性の遺伝的能力評価を行う上で、あらかじめ暑熱ストレスを表すための指標を決める必要があります。世界的に乳用牛における暑熱耐性の遺伝的能力評価に使用される暑熱ストレスの指標には、気温と湿度により計算されるいわゆる不快指数としても知られる温湿度指数（ $THI = 1.8 \times \text{気温} (^{\circ}\text{C}) + 32 - (0.55 - 0.0055 \times \text{相対湿度} (\%)) \times (1.8 \times \text{気温} (^{\circ}\text{C}) - 26)$ ）が利用されています。図2にはTHIと気温・相対湿度間の関係を示していますが、例えば、

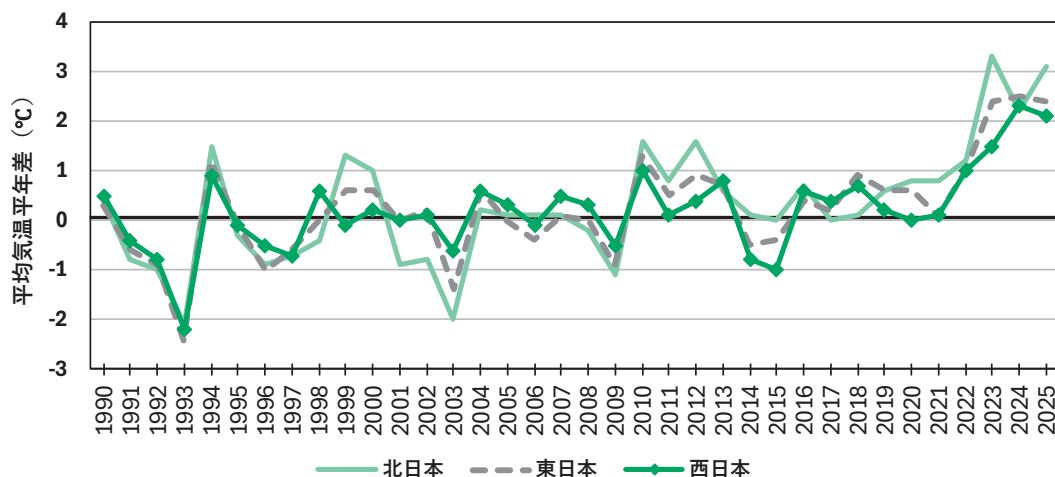


図1 3地域における夏季（7～9月）の平均気温平年差（°C）の推移

		気温 (°C)																
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
相 対 湿 度 (%)	35	59	60	61	62	63	64	66	67	68	69	70	71	73	74	75	76	
	40	59	60	61	62	63	65	66	67	68	70	71	72	73	74	76	77	
	45	59	60	61	62	64	65	66	67	69	70	71	73	74	75	76	78	
	50	59	60	61	63	64	65	67	68	69	70	72	73	74	76	77	78	
	55	59	60	61	63	64	66	67	68	70	71	72	74	75	76	78	79	
	60	59	60	62	63	64	66	67	69	70	71	73	74	76	77	78	80	
	65	59	60	62	63	65	66	68	69	70	72	73	75	76	78	79	81	
	70	59	60	62	63	65	66	68	69	71	72	74	75	77	78	80	81	
	75	59	60	62	64	65	67	68	70	71	73	74	76	77	79	81	82	
	80	59	60	62	64	65	67	69	70	72	73	75	77	78	80	81	83	
85	59	61	62	64	66	67	69	70	72	74	75	77	79	80	82	84		

図2 温湿度指数 (THI) と気温・相対湿度間の関係

気温が16℃で相対湿度が50%ならTHIは60、気温が25℃で相対湿度が50%ならTHIは72となり、THIが低いほど暑熱ストレスが小さく、高いほど暑熱ストレスが大きいことを意味します。

THI=60を閾値として乳量は3日前、体細胞スコアは8日前の暑熱ストレスが影響

萩谷ら (2019) は、気象観測所の気象情報を用い1日の平均気温と平均相対湿度からTHIを計算し、暑熱ストレスが検定日の乳量や体細胞スコアに影響が表れるタイミングについて分析した結果、乳量は3日前、体細胞スコアは8日前の暑熱ストレスが最も影響が強く、THIが60を超えたあたりから乳量の低下や体細胞スコアの増加が始まると報告しています。図3は、萩谷ら (2019) が報告した3日前のTHIに対する乳量と8日前のTHIに対する体細胞スコアの変化ですが、乳量と体細胞スコアは共にTHIが60を超えたあたりから変化しているのがわかります。THIが60を超える気温は約17℃からであり冷涼な気温のように思えますが、1日の平均気温が17℃であるなら日中の最高気温は20

℃を超えてくる場合が多く、平均気温が17℃でもホルスタインにとって十分に暑熱ストレスの影響を受け始めていると考えられます。

牛群に対する気象情報は牛群検定のカウダスを活用

暑熱耐性の遺伝的能力評価を行うには、牛群毎に気象情報 (平均気温と平均相対湿度) を紐づけする必要があります。そこで、日本の暑熱耐性の遺伝的能力評価には、牛群毎の気象情報として (一社) 家畜改良事業団が提供する各牛群の最寄りの気象観測所の気象情報と牛群検定データを結び付けた「カウダス」を活用しています。カウダスは牛舎内の気温や湿度を直接反映しているわけではありません。しかしながら、牛舎内に設置した温湿度計と最寄りの気象観測所の記録を用いた検証試験において、それらの間での暑熱ストレス耐性の検出精度は無視できるほど小さく、暑熱耐性の遺伝的能力評価では、牛群の効果 (牛舎固有の気温や飼養環境の違い) を補正することで、各牛群の最寄りの気象観測所の気象情報であるカウダスのデータが活

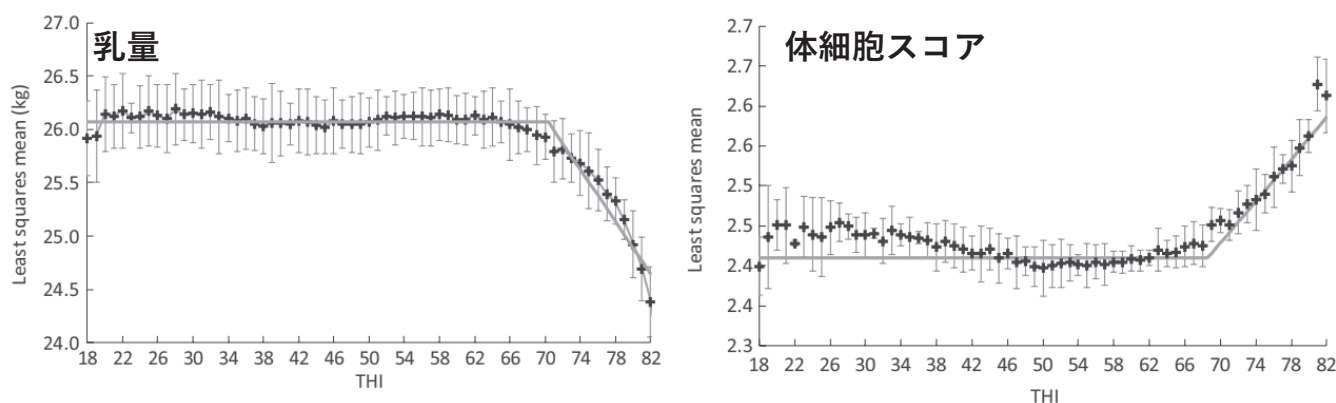


図3 THIに対する乳量と体細胞スコアの変化 (萩谷ら、2019)

用できることが確認されています。

暑熱耐性の遺伝評価値はTHIに対する乳量・体細胞スコアの変化量

上記の成果を踏まえ、乳量は検定日3日前のTHI、体細胞スコアは検定日8日前のTHIについてTHIが60以上となった際の乳量・体細胞スコアの変化・反応量を暑熱耐性の遺伝評価値として評価を行っています。図4はTHIに対する乳量と体細胞スコアの変化のイメージ図ですが、暑熱耐性の高い個体は暑熱ストレスに対する乳量の減少量と体細胞スコアの増加量が少なく、暑熱耐性の低い個体は暑熱ストレスに対する乳量の減少量と体細胞スコアの増加量が大きくなります。

日本における暑熱耐性の遺伝評価値は、暑熱ストレスがないTHI=60時と暑熱ストレスがあるTHI=72時の乳量と体細胞スコアの変化量について図5の式によって指数化しています。暑熱耐性は、体型の線形形質や泌乳持続性等の評価値と同じ、標準化育種価（SBV：2020年生まれの雌牛集団の平均値をゼロ、標準偏差を1とした評価値）で公表され、値が高いほど

暑熱ストレスに対する遺伝的な耐性が高く、低いほど暑熱ストレスに対する遺伝的な耐性が低いことを意味します。

暑熱耐性は乳質や繁殖性と好ましい関係だが、乳生産量とは好ましくない関係に注意

表1に種雄牛と雌牛について暑熱耐性の評価値と主要形質間の評価値との相関係数を示しました。暑熱耐性は、乳質（乳成分率・体細胞スコア）や繁殖性と好ましい関係性にあり、暑熱耐性が高い個体はそれらの能力も高い傾向にある一方で、乳量・乳成分量とは好ましくない関係性があるため、過度に暑熱耐性を重視した改良は乳生産量が低下する恐れがあることに注意が必要です。そのため、交配種雄牛の選定や後継牛の選抜では、まず総合指数（NTP）で複数個体の選抜を行い、泌乳能力等の重要な生産形質について十分な能力を担保したうえで、その中から暑熱耐性に優れたものを選択することが、暑熱耐性を含めた多くの形質をバランスよく改良することにつながります。

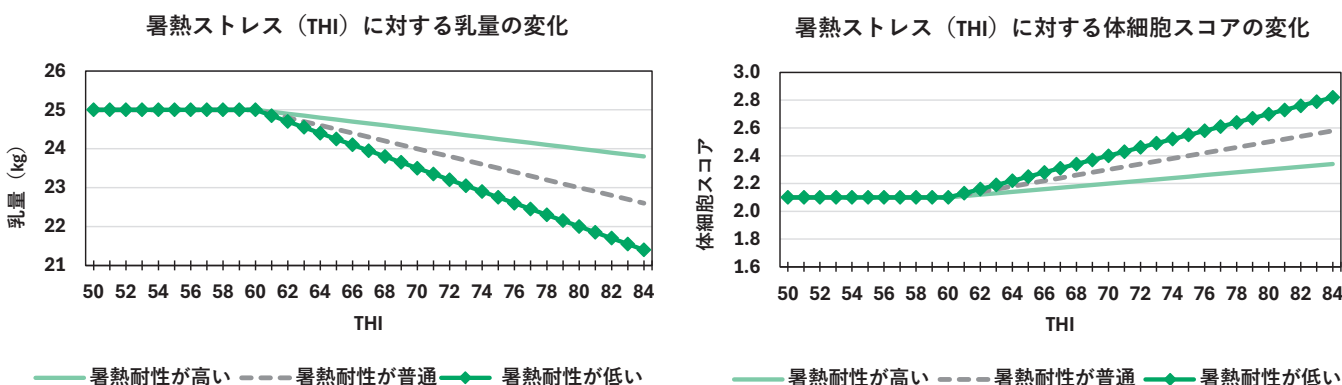


図4 暑熱ストレス（THI）に対する乳量と体細胞スコアの変化のイメージ

暑熱耐性（円）＝35.7円×暑熱耐性（乳量）－143.5円×暑熱耐性（体細胞スコア）

暑熱耐性(SBV)＝
$$\frac{\text{暑熱耐性（円）} - \text{遺伝ベース年生まれの雌牛の平均値（円）}}{\text{遺伝ベース年生まれの雌牛の標準偏差（円）}}$$

*「35.7円」は平成27～29年の生乳1kg当たりの所得、「－143.5円」は平均的な乳用牛における乳量に対する体細胞スコアの増加による経済的損失

図5 暑熱耐性の遺伝評価値の計算式

表1 暑熱耐性と主要形質間の関係性¹

形質	種雄牛	雌牛	関係性 ²
乳量	-0.37	-0.45	×
乳脂量	-0.03	-0.23	×
無脂固形分量	-0.35	-0.42	×
乳蛋白質量	-0.23	-0.34	×
乳脂率	0.24	0.21	○
無脂固形分率	0.16	0.25	○
乳蛋白質率	0.22	0.26	○
体細胞スコア	-0.39	-0.36	○
未経産娘牛受胎率	0.06	0.06	○
初産娘牛受胎率	0.14	0.19	○
空胎日数	-0.21	-0.28	○

¹ 遺伝評価値との相関² ○＝好ましい関係性、×＝好ましくない関係性

暑熱耐性の遺伝率は低い、暑熱耐性の高い種雄牛の娘牛は夏季の乳量の減少量と体細胞スコアの増加量が少ない傾向

暑熱耐性の遺伝率は乳量において1.1%、体細胞スコアにおいて0.5%と低く、また評価値自体の信頼度は、泌乳形質ほど高くはないため、暑熱耐性の遺伝評価値の信頼度は泌乳形質等と比べて低いです。しかしながら、暑熱耐性の遺伝評価値が高い種雄牛（+1以上）と低い種雄牛（-1以下）について娘牛の春季（3～5月）から夏季（7～9月）にかけての乳量の減少量を比較すると暑熱耐性の高い種雄牛の娘牛の方が夏季の乳量の減少量が少ない傾向にあります。表2は、2026-2月評価データを元に北日本、東日本及び西日

本において、夏季（7～9月）の平均気温が平年並みであった2006～2008年と猛暑であった2023～2025年について、暑熱耐性が+1以上の種雄牛と-1以下の種雄牛の娘牛の夏季（7～9月）及び春季（3～5月）の乳量と体細胞スコアの平均値を比較した結果です。平均気温が平年並みであった2006～2008年において北日本では乳量と体細胞スコア共に、種雄牛の違いによる娘牛の夏季の変化量に大きな差は見られませんでした。北日本よりも気温が高であろう東日本と西日本では夏季の乳量の減少量と体細胞スコアの増加量が、暑熱耐性の高い種雄牛（+1以上）からの娘牛の方が、暑熱耐性の低い種雄牛（-1以下）からの娘牛より小さい傾向（0.3～0.9kg）にありました。猛暑であった2023～2025年では、夏季の乳量の減少量が全ての地域において、暑熱耐性の評価値が高い種雄牛の娘牛の方が小さい傾向（0.5～1.0kg）にありました。すなわち、暑熱耐性の高い種雄牛の娘牛の夏季の日乳量の減少量が、暑熱耐性の低い種雄牛の娘牛よりも約1kg少ないとすると、夏季（90日間）における経済的損失を乳価＝122.2円（乳用牛群能力検定成績のまとめ令和6年度-）で換算した場合1頭当たり10,998円の差となり、搾乳牛50頭規模の牛群において暑熱耐性の高い種雄牛の娘牛を揃えた牛群とそうでない牛群では、夏季の乳量の減少による経済的損失の差は約55万円となりました。また、体細胞スコアは、西日本において大きな差は見られませんでした。北日本と東日本では暑熱耐性の評価値が高い種雄牛の娘牛の方が、夏季の増加量が小さい傾向にありました。加えて、暑熱耐性は繁殖性と好ましい遺伝的關係にあるこ

表2 種雄牛の暑熱耐性の違いによる娘牛の乳量と体細胞スコアの暑熱ストレスの影響の比較

時期 (気温)	地域	暑熱耐性 (評価値)	頭数	乳量 (kg)				体細胞スコア			
				夏季 ¹	春季 ²	差分 ³	Δ差分 ⁴	夏季 ¹	春季 ²	差分 ³	Δ差分 ⁴
2006～2008 (平年並)	北日本	+1以上	682	27.8	29.2	-1.4	-0.1	2.76	2.58	0.18	0.05
		-1以下	255	29.6	30.9	-1.3		2.79	2.66	0.13	
	東日本	+1以上	344	28.3	30.9	-2.6	0.9	2.81	2.67	0.14	-0.22
		-1以下	159	29.5	33.0	-3.5		2.96	2.60	0.36	
	西日本	+1以上	484	27.4	30.1	-2.7	0.3	2.99	2.68	0.31	-0.07
		-1以下	214	27.4	30.4	-3.0		3.09	2.71	0.38	
2023～2025 (猛暑)	北日本	+1以上	365	30.3	32.1	-1.8	0.8	2.37	2.05	0.32	-0.05
		-1以下	410	31.1	33.7	-2.6		2.59	2.22	0.37	
	東日本	+1以上	178	30.0	33.1	-3.1	0.5	2.66	2.35	0.31	-0.13
		-1以下	208	30.6	34.2	-3.6		3.05	2.61	0.44	
	西日本	+1以上	238	28.8	32.3	-3.5	1.0	2.70	2.18	0.52	0.04
		-1以下	256	29.3	33.8	-4.5		3.20	2.72	0.48	

¹ 夏季＝7～9月、² 春季＝3～5月、³ 差分＝夏季－春季、⁴ Δ差分＝暑熱耐性（+1以上）－暑熱耐性（-1以上）

とから、暑熱耐性が高い種雄牛の娘牛と暑熱耐性が低い種雄牛の娘牛の経済的損失の差は、乳量の減少量以上に大きいと思われます。

最後に

暑熱耐性の遺伝的能力評価は、著者が知る限り日本以外にオーストラリアとイタリアで実施されていますが、主要な海外種雄牛精液の輸入元であるアメリカとカナダではまだ評価が開始されておらず、アメリカやカナダからの輸入精液の暑熱ストレスに対する遺伝的な耐性は未知です。そのため、能力が高いと期待して導入した海外種雄牛の娘牛が夏季に十分な能力を発揮しない恐れもあります。したがって、(独)家畜改良センターが公表している暑熱耐性の遺伝評価値は、高温多湿な日本の飼養環境に適した種雄牛を選定するうえで重要な形質だと言えます。一方で、暑熱耐性の遺伝評価値は遺伝率が低く、信頼度が十分には高いとは言えません。そこで、最近では乳用牛に対する暑熱ストレスを検出するための形質として代謝関連形質である乳中の β ヒドロキシ酪酸(BHB)に着目した研究が進められおり、BHBを利用することで暑熱ストレスの検出精度の向上が見込めることが分かってきていま

す(Ishidaら2024)。このように遺伝的能力評価手法の改善による信頼性の高い暑熱耐性の評価値の開発を関係者一丸となって進めており、より効率的な暑熱耐性の遺伝的改良を進めてまいります。

参考文献

- 1) Koichi Hagiya, Ikumi Bamba, Takefumi Osawa, Yamato Atagi, Naozumi Takusari, Fumiaki Itoh & Takeshi Yamazaki. (2019). Length of lags in responses of milk yield and somatic cell score on test day to heat stress in Holsteins. *Animal Sci J*, 90, 613-618.
- 2) Satoka Ishida, Akiko Nishiura, Takeshi Yamazaki, Hayato Abe, Satoshi Nakagawa, Yuka Nakahori, Shigeki Yamaguchi, Yutaka Masuda, Yuriko Saito, Ryoki Tatebayashi, Takefumi Osawa, Che-Hsuan Huang, Koichi Hagiya. (2024). Effects of heat stress on predicted energy balance, fat-to-protein ratio, and milk β -hydroxybutyrate in first-lactation Holstein cattle in Hokkaido, Japan. *Animal Sci J*, 95 : e70013.

家畜改良事業団
SNS・メルマガやってます!

NEW

@liaj_official

@liaj_official

@liaj_official

@liaj_official

Mail Magazine

フォロー・ご登録お待ちしております♪