

放牧地の環境条件に合わせた
和牛放牧管理に関する研究

兒嶋 朋貴

2022

目次

目次	i
表のリスト	iii
図のリスト	v
第 1 章 序論	1
第 2 章 佇立時に対する水平および傾斜歩行時のエネルギー消費量比の推定式 作成とそれを用いた耕作放棄地放牧牛のエネルギー消費量の推定	6
2.1 緒言	6
2.2 材料および方法	7
2.3 結果	13
2.4 考察	21
第 3 章 GPS および GIS を用いた放牧牛の耕作放棄地における空間的利用パ ターンとそのエネルギー消費量との関係	26
3.1 緒言	26
3.2 材料および方法	27
3.3 結果および考察	34
第 4 章 放牧牛の吸血昆虫対策技術の開発	43
4.1 緒言	43
4.2 材料および方法	44
4.3 結果	49
4.4 考察	52
4.5 結論	55
第 5 章 黒毛和種繁殖雌牛のボディーコンディションスコア推定法の開発：3D 画像解析と機械学習によるアプローチと胸囲測定による簡易なアプローチ ..	56
5.1 緒言	56

5.2 材料および方法	58
5.3 結果および考察	66
5.4 結論	76
第 6 章 総括	78
謝辞	83
引用文献	85
業績リスト	104

表のリスト

Table 2.1 Results of least squares analysis of variance for energy expenditure, walking distance, mean slope gradient and walking speed	20
Table 3.1 Mean durations of daytime and nighttime and mean numbers of global positioning system (GPS) data used for analyses	30
Table 3.2 Mean sizes and average slope gradients (ASG) of each intensity utilization area, and mean energy expenditure (EE).....	35
Table 3.3 Results of least squares analysis of variance for size and average slope gradients (ASG) of each intensity utilization area estimated from the GPS data by daytime or nighttime of each experimental day	38
Table 3.4 Correlation coefficients between energy expenditure and size of each intensity utilization area	41
Table 3.5 Correlation coefficients between energy expenditure and average slope gradients (ASG) of each intensity utilization area	42
Table 4.1 Numbers of biting flies on the experimental cows and the frequencies of fly-repelling behaviors	51
Table 5.1 Status of experimental cows (lactation and pregnancy) and the distribution of manual body condition score (BCS) obtained from the experimental cows.	60
Table 5.2 Confusion matrix with the number of samples classified according to the body condition score (BCS) classes of Japanese Black cows, and the overall accuracy, precision, sensitivity, and F-measure by a selected machine learning	

algorithm with all four three-dimensional (3D) body features (i.e., 3D surface area, 3D volume, base surface area projected on a plane passing through the three landmarks, and average distance between 3D surface of rump area and the plane).....71

図のリスト

Figure 2.1 Experimental area: its aerial photo (a), contour map (b), and 3D map (c: focal point - North).	11
Figure 2.2 Ratios of energy expenditure of walking to that of standing calculated from published reports (The differences in the ratios of EE for same gradients are caused by the differences in walking speeds).....	14
Figure 2.3 Evaluation of the equation estimated in this study by the equation for sheep presented by Brockway and Boyne (1980).....	16
Figure 2.4 Frequency distributions of walking speeds (a) and gradients (b) in each season.....	18
Figure 3.1 Image diagram showing utilization distribution (a) and an example of estimated three levels of intensity utilization area. Black, dark-gray, and light-gray areas show high, middle, and low intensity utilization areas, respectively.	32
Figure 4.1 Examples of experimental cows with/without painted stripes. (a)Black - and-white striped cattle (B&W) with white lacquer, (b) Black-striped cattle (B) with black lacquer, (c) No stripe cattle (CONT).	46
Figure 4.2 Example of the area of legs and body used to count biting flies on cows.	48
Figure 4.3 Number of biting flies on legs and body (a) and the frequency of total fly-repelling behaviors (b) of the experimental cows	50
Figure 5.1 Body parts where body conditions are scored to assess the body condition	

score (BCS) of Japanese Black cows.....59

Figure 5.2 (a) Examples of three-dimensional (3D) image processing to extract 3D body features; that is, the localizations of three landmarks (hooks, thurls, and pins); (b) 3D surface of the rump region used to calculate its area; (c) 3D surface of the rump region and a plane passing through the three landmarks, wherein the yellow dotted square line shows the sides of the plane; (d) a base surface showing that the 3D surface of the rump area is projected on the plane; and (e) image diagram showing the distance between the 3D surface of the rump region and the plane, wherein the yellow dotted line shows the plane.
.....63

Figure 5.3 Relationships between manual body condition score (BCS) classes and 3D surface areas of the rump area [3D surface area] (a), volumes of the space between the 3D surface of the rump area as the ceiling and plane passing thorough the landmarks as the ground [3D volume] (b), base surface areas projected on the plane passing thorough the landmarks [base surface] (c), and average distances between the 3D surface of the rump area and the plane [average distance] (d). Box plots indicate median lines and 25th and 75th percentiles.67

Figure 5.4 Relationship between manual body condition score (BCS) classes and the differences between heart girth (HG) and tightened heart girth (THG) for Japanese Black cows. Box plots indicate the median lines and the 25th and 75th percentiles. Outliers in the manual BCS values are plotted individually as “ °.”
.....75

第 1 章 序論

わが国の放牧は、6 世紀前半には「牧野に放つ」という意味でのウシの放牧が行われており、その後、戦後まで粗放的で、原野・山林を利用した共同入会放牧が主として行われてきたとされている（加藤 1980; 辻井 2005）。昭和 30 年代に始まった農村におけるモータリゼーションの影響により、和牛は役用牛から肉用牛へと飼育目的が変化した。その結果、生産性が追及され、輸入飼料に依存した周年舎飼い方式へと転換するとともに放牧は急速に衰退した（加藤 1984; 辻井 2005）。

1990 年代から 2000 年代に、簡易に柵を設置できる電気牧柵や小型ピロプラズマ病を媒介するダニの殺ダニ剤が開発され普及するとともに、低迷する飼料自給力の強化、資源循環型農業への関心の高まり、さらには増加する耕作放棄地の解消といった社会的背景から、和牛放牧が見直されてきている（中西 2002; 梅村 2007; 山中ら 2008）。現在においても、農林水産省が 2020 年に策定した「酪農及び肉用牛生産の近代化を図るための基本方針」において、引き続き放牧の推進が盛り込まれている（農林水産省 2020）。

和牛放牧においては、放牧されるウシのほとんどが繁殖雌牛である（千田 2010）。和牛繁殖経営における放牧のメリットとしては、飼料費といった生産コストの削減、給餌や家畜排泄物処理が不要または軽減されることによる飼養管理作業の省力化および放牧で空いた牛舎を利用した増頭が挙げられる。千田（2016）は、線形計画法を用いて、肉用牛繁殖経営の評価モデルを構築し、家族経営を前提とした放牧方式の違いによる収益性等を比較している。この研究において比較されている放牧方式は、全頭周年舎飼い方式、妊娠牛のみ季節移動放牧、繁殖牛の周年定置放牧および周年親子定置放牧の 4 方式であった。その試算によると、全頭周年舎飼い方式に比べてその他の放牧方式では、子牛 1

頭あたりの生産コストは約 4～40%の低減,同労働時間は約 10～67%の省力化,そして繁殖牛 2～51 頭の増頭が可能と報告されている. 千田 (2016) のモデルでは,各放牧方式で土地利用面積が大きく異なるため,放牧によるメリットの効果に大きな幅があるが,妊娠牛のみ季節移動放牧の方式においても全頭周年舎飼い方式に比べて生産コスト低減,省力化および増頭が可能であり,和牛放牧は和牛繁殖経営においてメリットがあると考えられる.

一方,放牧はある意味ウシの自主性に任せた飼養法であるため(渡辺ら 2020),和牛放牧に伴う事故や疾病のリスクも存在する. 千田 (2012) は和牛の水田放牧におけるリスクを,管理者のリスク,放牧牛自体のリスクおよび居住者,作物および交通に及ぼすリスクの 3 つに分類して報告している. 管理者のリスクには①牛の入退牧,捕獲および移動に伴って発生しがちである管理者の被る怪我等が含まれる. 放牧牛自体のリスクには,②転落等の怪我,③栄養低下,④熱中症,⑤中毒症および⑥昆虫等が媒介する疾病感染が含まれ,居住者,作物および交通に及ぼすリスクには,⑦環境問題と⑧脱柵による周辺作物の食害や交通事故等(脱柵)が含まれる. これらのリスクは水田放牧に特有のリスクではなく,林間放牧や中山間地域での耕作放棄地放牧といった他の放牧方式においても共通するリスクと考えられる. そのため,和牛放牧の実施においては,これらのリスクを可能な限り低減することが肝要である. しかしながら,和牛放牧には多様な形態が存在し,放牧を行う地域によって環境条件が大きく異なるため(辻井 2005),これらのリスクが顕在化する要因はそれぞれの放牧地の環境条件によって異なると考えられる.

これらの 8 つのリスクは,リスクが顕在化する要因の観点から,次の 4 グループに再分類が可能である. まず,(i)放牧計画に起因するリスクであり,これには①牛の入退牧,捕獲および移動に伴って発生しがちである管理者の被る怪我等,②転落等の怪我および④熱中症が分類される. 次に,(ii)放牧牛のエ

エネルギー収支に起因するリスクであり、これには③栄養低下、⑤中毒症および⑧脱柵が分類される。さらに、(iii)放牧牛の放牧地内の利用状況に起因するリスクであり、これに⑦環境問題が分類される。最後に、(iv)衛生害虫に起因するリスクであり、これに⑥昆虫等が媒介する疾病感染が分類される。(i)については、放牧を実施する前の計画段階において対策を講じることで低減できるリスクであると考えられる。①牛の入退牧、捕獲および移動に伴って発生しがちである管理者の被る怪我等に対しては放牧に適したウシの選定や誘導方法、②転落等の怪我等に対しては放牧前に放牧地内の危険箇所を確認し、該当箇所の放牧地からの除外、④熱中症に対しては日隠林を放牧区内に含める、あるいは寒冷紗等を用いた簡易な日陰施設の設置が対策として挙げられる。(ii)については、放牧牛のエネルギー収支が負の状態が続くことにより顕在化するリスクである。③栄養低下はエネルギー収支が負の状態であることは明らかであるが、⑤中毒症と⑧脱柵については、それぞれ有害植物の除去および適切な牧柵の管理が前提であるものの、放牧牛がエネルギー消費量(EE)に対して十分量のエネルギーを摂取できれば、有害植物の採食や脱柵は基本的に起きないと言われている(近畿中国四国農業研究センター 2009)。したがって、(ii)のリスク低減には、放牧牛のエネルギー収支が負にならないよう、補助飼料給与量の調整、あるいは移牧や退牧の判断が重要であり、そのためには放牧牛のEEの把握が必要である。(iii)の⑦環境問題については、放牧牛が放牧地内のある特定地域に偏って利用している場合に顕在化するリスクである。家畜は放牧地を利用する上で、植生、土壌およびその周辺の水系といった環境に影響を与え(Cooperら 2008)、ある特定地域を偏って利用した場合、過放牧による裸地化、糞尿の集中による土壌および水系の汚染が起きる可能性が指摘されている(杉本ら 2005; Hesseら 2008)。したがって、(iii)のリスクを低減するためには、放牧牛の放牧地内における行動圏(ある個体が採食・繁殖・子育てに通常利用する

場所 (Burt 1943)) についての情報が必要である (Bailey ら 1996; Parsons ら 2003; 杉本ら 2005). 最後に, (iv) の⑥昆虫等が媒介する疾病感染については, 環境中に衛生害虫が存在しているため, 継続的に対策を講じる必要のあるリスクである. 小型ピロプラズマ病を媒介するダニに対しては, 定期的な殺ダニ剤の塗布が推奨されているが (近畿中国四国農業研究センター 2009), 牛伝染性リンパ腫を媒介すると言われていたアブやサシバエといった吸血昆虫 (Ohshima ら 1981; Buxton ら 1985) に対しては, 舎飼い時のような換気扇の送風による防除や脱皮阻害剤による薬剤防除を放牧地において実施することは現実的に困難である. そのため, 吸血昆虫が環境中に存在していても, 吸血昆虫が放牧牛を忌避し, 直接牛体に付着しないような対策技術が必要である.

一方, 放牧を行っている間は, 補助飼料の給与や牧柵の確認といった日々の管理が必要であるが (近畿中国四国農業研究センター 2009), これに加えて定期的に放牧牛の栄養状態や健康状態を確認・評価することは重要と考えられる. この栄養状態や健康状態の評価にはボディーコンディションスコア (BCS) を用いるのが有効である (Ferguson ら 1994). BCS は家畜のエネルギー出納を反映しており (Thorup ら 2012), また, 急激な BCS の変化は疾病の発症や飼養管理の不備のサインとなるため (Rathbun ら 2017; Chebel ら 2018), BCS の評価を通じて, 異常牛の早期発見に加え, 日頃の放牧管理の評価および改善につなげることが可能となる. しかしながら, 和牛の BCS は栄養度判定要領 (全国和牛登録協会 2017) に定められているが, 本要領に従って BCS を判定するには一定期間の訓練と経験が必要であると推察され, 放牧管理者自らが放牧牛の BCS を判定するのは困難である. そのため, 放牧管理者が一定期間の訓練や経験を必要とせずとも栄養度判定要領 (全国和牛登録協会 2017) による BCS を推定できる手法の開発が必要であると考えられる.

以上のことから, 本研究では, 放牧地によって異なる環境条件に合わせた和

牛放牧管理のために、放牧に伴うリスクの低減に寄与する知見および技術を提示することを目的とした。第 2 章では、家畜の EE を推定する式を作成し、放牧牛の EE の推定を行った。第 3 章では、放牧牛の行動圏を通じて、放牧地内での空間的な利用パターンを把握し、空間的利用パターンと EE との関係を解析した。第 4 章では、新たな吸血昆虫対策技術として、シマウマの縞模様は吸血昆虫を忌避する機能という仮説を和牛に応用し、その効果の検証を行った。第 5 章では、放牧管理者が訓練や経験を必要とせずとも客観的に和牛の BCS 推定を可能とする新たな手法の開発を行った。

第 2 章 佇立時に対する水平および傾斜歩行時のエネルギー消費量比の推定式作成とそれを用いた耕作放棄地放牧牛のエネルギー消費量の推定

2.1 緒言

近年，わが国では，中山間地域に多く存在する耕作放棄地の未利用資源を有効利用し，かつ雑草防除や獣害の軽減を目的としたウシの放牧が行われている．このような耕作放棄地での放牧では，繁殖雌牛が放牧されることが多いため，放牧牛の体重維持が第一に重要視される．放牧では舎飼いの場合と比べて家畜のエネルギー要求量が増加するため（Brosh ら 2006a），放牧牛のエネルギー消費量（EE）は，放牧牛の体重維持に有益な情報となる．

日本飼養標準（農業・食品産業技術総合研究機構 2009）によると，放牧牛の EE は起伏の多い地形や草量が少ない場合などに増加程度が大きくなるとされている．多くの耕作放棄地は中山間地域に存在するため地形条件が厳しい場合が多い．したがって，当該地域での放牧では EE の推定がより重要となると考えられる．

Shibata ら（1981）は歩行速度および歩行傾斜角度の正弦値からウシの EE を推定する重回帰式を報告している．しかし，Shibata ら（1981）による EE 推定式は歩行傾斜角度が 0 度以上，つまり水平および上り歩行のみであり，歩行傾斜角度が 0 度未満，つまり下り歩行は考慮されていない．通常，放牧家畜は水平および上り歩行だけでなく，下り歩行も行うため，下り歩行も考慮された EE 推定式が必要となると考えられる．

近年，すでに報告されている複数の試験結果のデータや文献値を定量化して統合する分析が医学や薬学の分野において盛んに利用され（Normand 1999; 丹後 2002），畜産学の分野でもそのような分析が行われている（広岡 2009）．ウ

シでは水平および上り歩行の EE の測定結果は報告されているが (Ribeiro ら 1977; Shibata ら 1981; Thomas と Pearson 1986; Di Marco と Aello 1998; 安藤と 的場 2006), 下り歩行の EE の測定結果は報告されていない。しかし, 他の有 蹄動物種では下り歩行の EE の測定結果も幾つか報告されている (ヒツジ: Clapperton 1964; Dailey と Hobbs 1989, ロバ: Yousef と Dill 1969; Yousef ら 1972, トナカイ: White と Yousef 1978, ヤギ: Dailey と Hobbs 1989; Lachica ら 1997, ブタ: Lachica と Aguilera 2000)。よって, これらの報告をまとめ, 水平および 上り歩行だけでなく, 下り歩行も考慮した様々な有蹄動物種に対する EE 推定 式を作成することが可能であると考えられる。

1990年代の中頃から, 動物の位置情報取得に Global Positioning System(GPS) の利用が急速に広まっており (Schlecht ら 2004), また GPS で得られた位置情 報と地理情報との統合やデータの解析に Geographical Information System (GIS) が利用されている。歩行速度および歩行傾斜角度は, GPS の位置情報を GIS に 取り込み, 標高の情報と統合することにより算出することができる。したがっ て, EE 推定式を作成し, GPS と GIS を利用することにより, 放牧家畜の EE を 推定することが可能となると考えられる。

そこで本研究では, これまでに行われてきた複数の EE 測定試験の結果を用 いて, 水平および上り歩行だけでなく下り歩行も含めた EE 推定式を作成し, さらにその推定式を用いて, 実際に耕作放棄地に放牧されているウシの EE を 推定することを目的とした。

2.2 材料および方法

2.2.1 重回帰分析による EE 比推定式の作成

2.2.1.1 EE 比推定式の作成に用いた文献値および作成方法

EE 推定式を得るため, Lachica と Aguilera (2005) の総説を基に, 有蹄動物

の水平佇立時および水平あるいは傾斜歩行時における，実測の熱産生量もしくは酸素消費量を報告した試験結果を文献値として引用し，それを分析データ（ $n = 82$ ）として用いた．これらの試験における供試動物は，ヒツジ（Clapperton 1964; Dailey と Hobbs 1989），ロバ（Yousef と Dill 1969; Yousef ら 1972），ウシ（Ribeiro ら 1977; Shibata ら 1981; Thomas と Pearson 1986; Di Marco と Aello 1998; 安藤と的場 2006），トナカイ（White と Yousef 1978），ヤギ（Dailey と Hobbs 1989; Lachica ら 1997）およびブタ（Lachica と Aguilera 2000）であった．また，歩行速度は 10.02 m/分から 90.00 m/分の間であり，歩行傾斜角度は -21.5 度から 21.5 度の間であった．

Boyne ら（1981）は，ヒツジの歩行による EE 増加量（ Δ EE J/kg/m）を歩行速度と歩行傾斜角度から算出する Brockway と Boyne（1980）による推定式は，他の動物種では当てはまらなかったと報告している．そこで本研究では，水平佇立時の熱産生量もしくは酸素消費量を 1 とした場合の水平あるいは傾斜歩行時の熱産生量もしくは酸素消費量の比（EE 比）を求めることで体重の影響を相殺し，これを目的変数として EE 比推定式を得るために重回帰分析を行った．以下に，その目的変数となる EE 比の算出式（1）を示す．

$$\text{EE比} = \frac{\text{水平歩行あるいは傾斜歩行時の熱産生量もしくは酸素消費量}}{\text{水平佇立時の熱産生量もしくは酸素消費量}} \quad (1)$$

Lachica ら（1997）を例にとると，歩行速度が 30 m/分で歩行傾斜角度が 5.71 度の場合の熱産生量が $19011 \text{ J/kg} \cdot \text{時}$ であり，水平佇立時の熱産生量 $6987 \text{ J/kg} \cdot \text{時}$ であるので，このときの EE 比は式（1）に従い 2.72 と算出される．一方， Δ EE は EE と歩行距離の一次回帰式の係数であり，Brockway と Boyne（1980）による Δ EE の推定式から EE 比を計算すると，歩行速度の 3 乗，歩行速度 \times 歩行傾斜角度および歩行速度 \times 歩行傾斜角度の 2 乗の項が説明変数に含まれることになる．しかしながら，これらの変数を含めると数学的に煩雑であるため，本

研究では説明変数に上記の項は含めず，歩行速度（m/分），歩行速度の 2 乗値，歩行傾斜角度（度）および歩行傾斜角度の 2 乗値を用いた．重回帰分析は SAS（SAS Inst. Inc., Cary, NC）の REG プロシジャを用いて行った．

2.2.1.2 -15 度および-10 度における EE 比推定値の検討

EE 比推定式に用いたデータにおいて，歩行傾斜角度が-15 度および-10 度付近の実測の文献値が不足していたため，本研究の EE 比推定式と Brockway と Boyne（1980）による Δ EE の推定式を基に算出した，歩行傾斜角度が-15 度および-10 度における EE 比を比較し，本研究の EE 比推定式が-15 度および-10 度について妥当かどうかの検討を行った．検討には，本研究の EE 比推定式作成に利用した文献値を基に，20 m/分，40 m/分，60 m/分および 80 m/分の 4 速度を歩行速度として設定した．Brockway と Boyne（1980）による Δ EE の推定式を基にした EE 比の算出は以下のように行った．歩行時の EE は式（2）のように表されるため，

$$EE \text{ (J/kg/分)} = \Delta EE \text{ (J/kg/m)} \times \text{歩行速度 (m/分)} + \text{佇立時の EE (J/kg/分)} \quad (2)$$

まず，検討用に設定した歩行速度および歩行傾斜角度における Δ EE を Brockway と Boyne（1980）の推定式から求めた．求めた Δ EE に歩行速度を乗じ，それに水平佇立時の EE を加えることで歩行時の EE を算出した．この歩行時の EE を水平佇立時の EE で除することで EE 比を求めた．この際，水平佇立時の EE の値は，Brockway と Boyne（1980）に報告されていなかったため，Clapperton（1964）の報告に従った．Brockway と Boyne（1980）による Δ EE の推定式を基に算出した EE 比を説明変数とし，本研究の EE 比推定式から算出した値を目的変数として単回帰分析を行い，得られた単回帰式の切片および傾きが，それぞれ 0 および 1 と異なるかを検定した．切片については，単回帰分析で得られた切片を，切片の標準誤差で除した t 値，傾きについては，傾きと 1

の差を、傾きの標準誤差で除した t 値を、それぞれ求めることで検定を行った。

2.2.2 耕作放棄地放牧牛の EE の推定

2.2.2.1 試験地および供試牛

本研究では、京都府綾部市の面積 3.34 ha の耕作放棄地（N：35° 20' 14.79" ~ 35° 19' 59.21"，E：135° 11' 54.68" ~ 135° 12' 05.96"，標高：50 m ~ 100 m，平均傾斜角度：17 度）を試験地とした（図 2.1）。試験地は急傾斜でスギとタケが優占している山林地と，野草が茂る休耕田および植林地等の平坦地で構成されている。試験地の中央東部の平坦部には，補助飼料を給与する施設があり，試験地の中央部には水路がある。試験地の外周は電気牧柵で囲った。供試牛には，2008 年 4 月 16 日から同年 11 月 7 日まで連続放牧されていた黒毛和種老廃雌牛 2 頭（11 歳齢：入牧時 470 kg，退牧時 483 kg；12 歳齢：入牧時 586 kg，退牧時 582 kg）を用いた。供試牛 2 頭ともに放牧経験豊富であり，そのうち 1 頭は前年の 2007 年にも本試験地での放牧を経験している。放牧期間中，補助飼料として 1 日 1 頭あたり 1 kg の米ぬかを毎朝夕に半量ずつ給与した。また，水とミネラルは自由摂取とした。

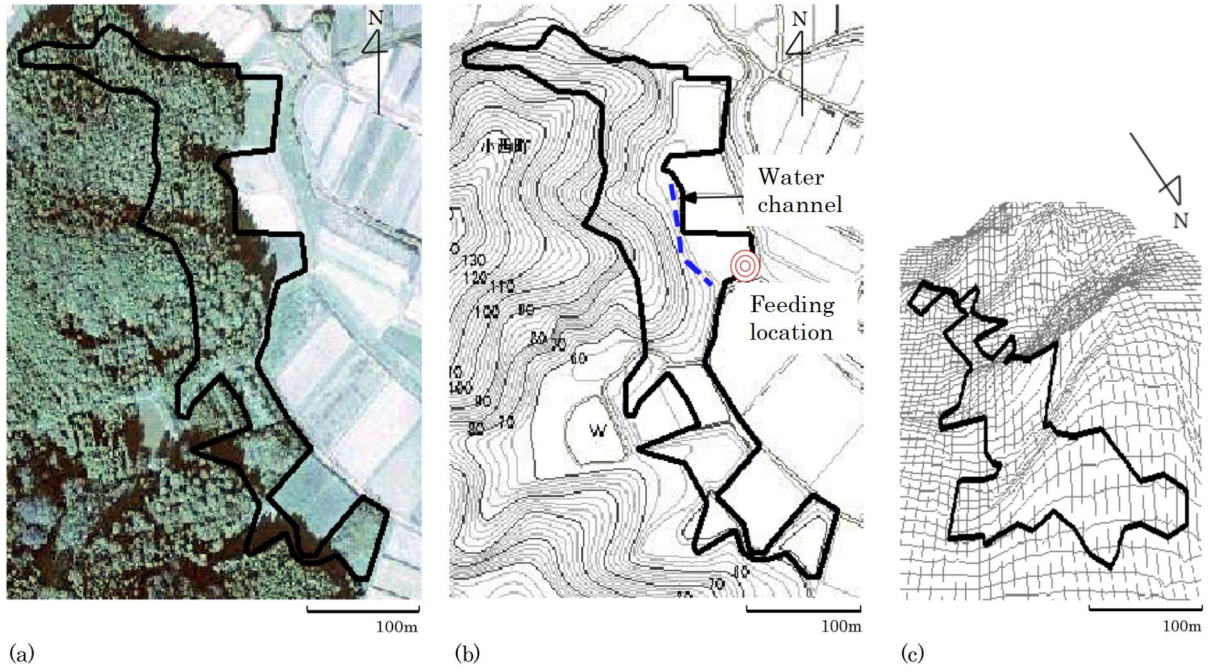


Figure 2.1 Experimental area: its aerial photo (a), contour map (b), and 3D map (c: focal point - North).

2.2.2.2 調査概要

2頭の供試牛にそれぞれGPS首輪(Lotek GPS2200および3300; Lotek Wireless Inc., Newmarket, Canada)を装着し, 2008年6月18日から7月3日(初夏), 同年9月4日から9月19日(初秋)および同年10月23日から11月6日(晩秋)の3期間, 終日の位置情報を取得した。GPSの測位間隔は試験期間を通して5分に設定した。

2.2.2.3 GPSデータおよび試験地地理情報の加工

取得したGPSデータおよび試験地地理情報の加工や統合にはGISフリーソフトウェアのIlwis3.4(International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands)を用いた。取得したGPSデータをGISに取り込み, その緯度および経度をUTM(Universal Transverse Mercator)座標系に変換した。また, GIS上で試験地周辺の等高線図から試験地のDEM(Digital Elevation Model)画像を作成し, それを用いてGPSで取得した各測位点の標高データを抽出した。

標高データを加えたGPSデータを各試験日(0:00~24:00)に分割し, 各測位点間の2次元における距離および標高差をUTM座標および標高データからそれぞれ算出した。さらにそれらを用いて, 3次元での歩行距離および歩行傾斜角度をそれぞれ算出した。また, 歩行速度は歩行距離を測位間隔時間で割ることで求めた。Swainら(2008)は, GPSを用いて放牧牛の歩行速度を調査し, その中で放牧牛の最速の歩行速度は36 m/分であったと報告しているため, 本研究ではSwainら(2008)の報告に従い, 歩行速度が36 m/分より速いデータ(初夏:2データ, 初秋:3データ, 晩秋:8データ)は分析から除外した。歩行速度および歩行傾斜角度のデータから, 本研究で作成したEE比推定式を用いてEE比を求めた。さらに, 求めたEE比に日本飼養標準(農業・食品産業技術

総合研究機構 2009)から算出した測位点間の維持に必要な代謝エネルギー要求量に乗じて EE を算出した。八木ら (1983) は 1.3 m/分が放牧牛の歩行速度で最も遅かったと報告しているため、本研究では八木ら (1983) の報告に従って、歩行速度が 1.3 m/分未満については、佇立と仮定した。また、各試験日における EE、総歩行距離、平均歩行速度および平均歩行傾斜角度を算出し、さらに平均歩行傾斜角度は歩行傾斜角度の絶対値を算出し求めた。

2.2.2.4 統計解析

季節（初夏、初秋および晩秋）が、EE、総歩行距離、平均歩行速度および平均歩行傾斜角度に及ぼす影響を調べるため、SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC) の GLM プロシジャを用いて一元配置の分散分析を行った。また最小二乗平均値間の差の検定は、Tukey と Kramer の多重比較法 (Kramer 1956) により行った。

2.3 結果

文献値のデータを基に算出した EE 比を図 2.2 に示す。図 2.2 において、同歩行傾斜角度の EE 比にばらつきがあるが、これは歩行速度の違いによる。この EE 比から重回帰分析によって得られた EE 比推定式は、

$$Y = 0.720445 + 0.022516S + 0.142664G + 0.009914G^2 \quad (3)$$

となり、また、決定係数 R^2 は 0.85 と高い値であった。ここで、 Y は EE 比、 S は歩行速度 (m/分)、 G は歩行傾斜角度 (度) である。歩行速度の 2 乗値は重回帰分析において有意性が見られなかったため説明変数から外した。また、切片に対し標準誤差から得られた t 値に対する検定では、統計的には切片と 1 との有意な差は認められなかった。

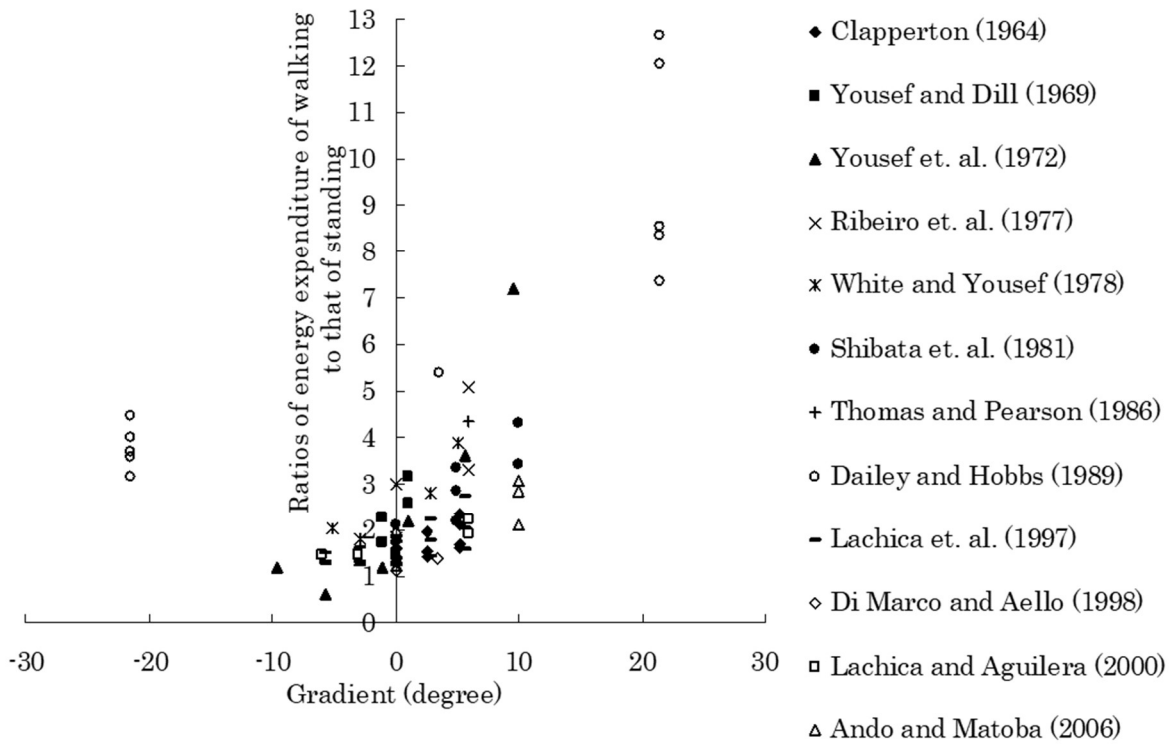


Figure 2.2 Ratios of energy expenditure of walking to that of standing calculated from published reports (The differences in the ratios of EE for same gradients are caused by the differences in walking speeds).

本研究で得られた EE 比推定式が -15 度および -10 度について妥当かどうかを検討した結果を図 2.3 に示す. 図 2.3 において, 直線 $y=x$ は Brockway と Boyne (1980) による \angle EE の推定式を基に算出した EE 比を示している. 本研究の EE 比推定式から算出した値は, 直線 $y=x$ に沿って分布した. 本研究の EE 比推定式から算出した値を目的変数とし, Brockway と Boyne (1980) による \angle EE の推定式を基に算出した EE 比を説明変数として求めた単回帰式の切片は 0.2316 であり, 傾きは 0.7524 であった. これら切片および傾きは, それぞれ 0 および 1 と統計的に有意に異なる値とはならなかった.

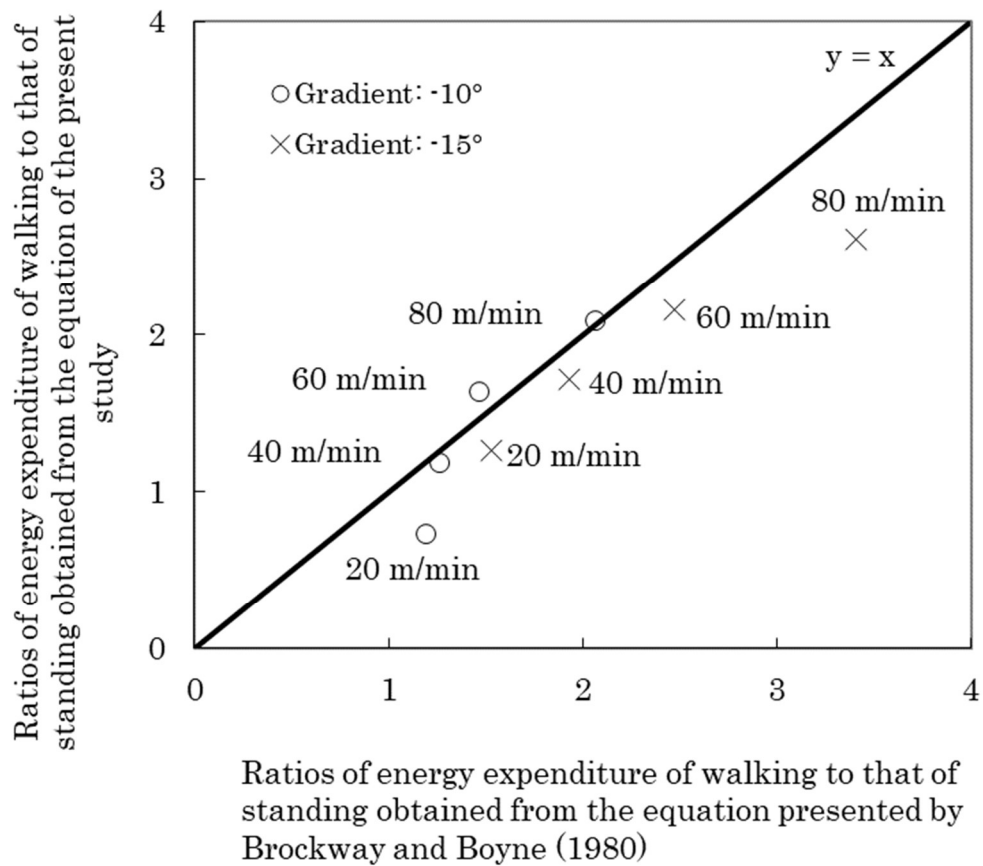
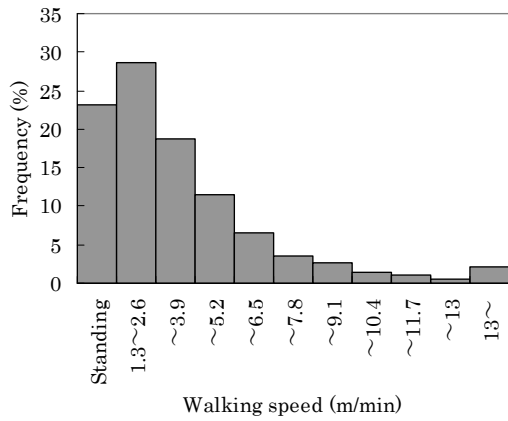


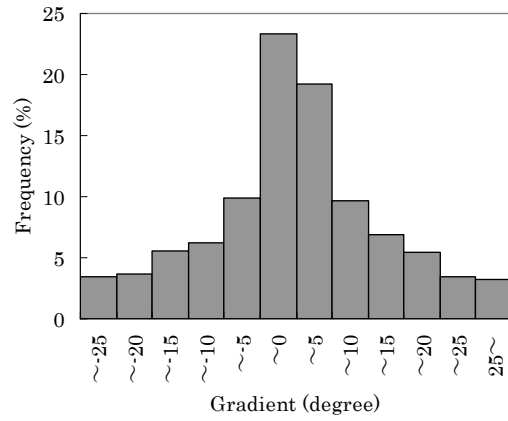
Figure 2.3 Evaluation of the equation estimated in this study by the equation for sheep presented by Brockway and Boyne (1980)

各季節における放牧牛の歩行速度と歩行傾斜角度の度数分布を図 2.4 に示す。歩行速度は季節を通じて 1.3 m/分～2.6 m/分が全体で約 30%，佇立を除いた場合では約 40%を占め，1.3 m/分～5.2 m/分が全体で約 60%，佇立を除いた場合では約 75%を占めていた。一方，佇立は，初夏（6月）に 23.15%であったのが晩秋（10月）には 29.57%と増加傾向が見られた。歩行傾斜角度は，初夏（6月）には-5度から 5度までが 42.51%を占めていたが，初秋（9月）および晩秋（10月）ではそれぞれ 29.82%および 28.22%と減少した。一方で，より急な歩行傾斜角度の占める割合が季節を経るごとに増加した。

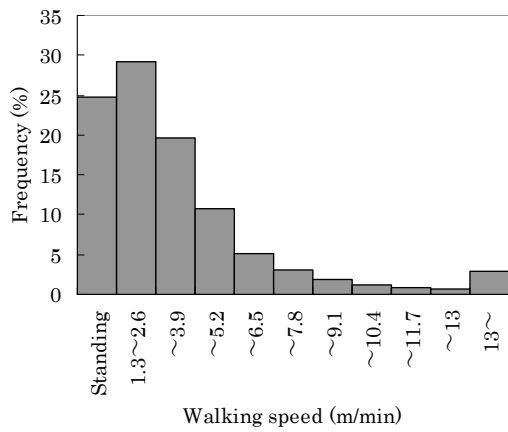
(a-1) June



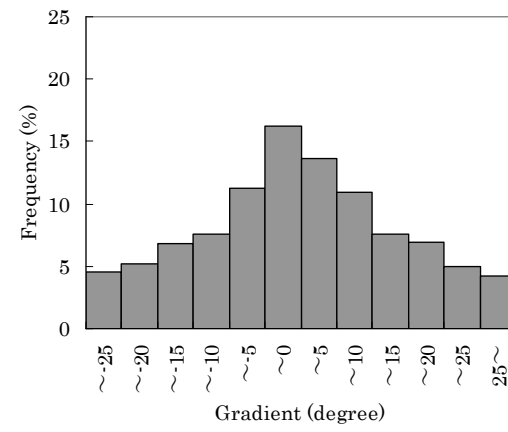
(b-1) June



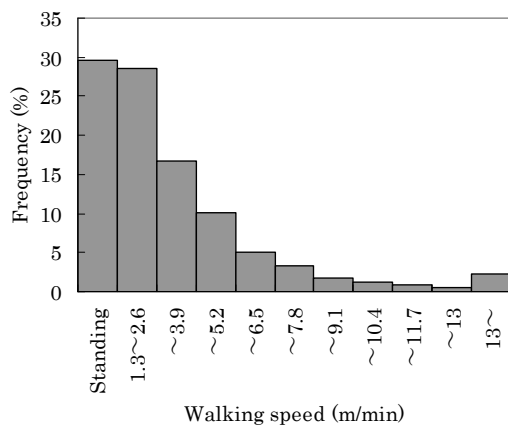
(a-2) September



(b-2) September



(a-3) October



(b-1) October

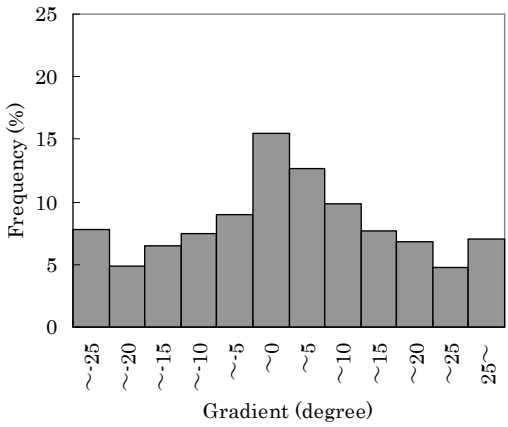


Figure 2.4 Frequency distributions of walking speeds (a) and gradients (b) in each season

季節が供試牛の EE, 総歩行距離, 平均歩行速度および平均歩行傾斜角度に及ぼす影響を調べた分散分析の結果を表 2.1 に示す. EE および平均歩行速度は季節間における有意な差は認められず, 季節を通して一定であったことが明らかとなった. 一方, 総歩行距離は季節を経るにつれて減少し ($P < 0.05$), 平均歩行傾斜角度は, 初夏 (6 月) と晩秋 (10 月) の間で有意な差が認められ ($P < 0.05$), 季節を経るにつれて急になる傾向が見られた.

Table 2.1 Results of least squares analysis of variance for energy expenditure, walking distance, mean slope gradient and walking speed

	June	September	October
Energy expenditure (kJ/kg ^{0.75} ·day)	905.97 ± 51.42 ¹⁾	901.21 ± 36.36	943.96 ± 37.73
Walking distance (m/day)	4288.86 ± 161.81 ^c	3801.98 ± 114.42 ^b	3393.00 ± 118.74 ^a
Mean slope gradient (degree)	9.62 ± 0.50 ^a	11.00 ± 0.35 ^{ab}	11.84 ± 0.37 ^b
Mean walking speed (m/min)	4.16 ± 0.13	4.30 ± 0.09	4.16 ± 0.09

¹⁾ Least squares means with standard errors.

^{a, b, c} LSMeans within a row with different superscripts significantly differ (P<0.05).

2.4 考察

Boyne ら (1981) は、ヒツジを用いた Brockway と Boyne (1980) による $\triangle EE$ の推定式は他の動物種には当てはまらなかったと報告している。Taylor ら (1982) は、 $\triangle EE$ に及ぼす体重の影響を指摘しており、このことが他の動物種に当てはまらなかった要因の 1 つと考えられた。一方、Taylor ら (1982) は同報告において、 $\triangle EE$ に及ぼす体重の影響 (体重の -0.316 乗) と佇立時の EE に及ぼす体重の影響 (体重の -0.303 乗) は、体重の指数上、 0.013 しか異ならないと報告している。本研究において EE 比推定式を得るために利用した文献値はヒツジ、ロバ、ウシ、トナカイ、ヤギおよびブタと複数の動物種から構成されていたにも関わらず、決定係数 R^2 は 0.85 という高い値であった。これは、EE 比の算出により、分母分子の体重の影響を実質的に相殺できたことによると考えられた。

Lachica と Aguilera (2000) によれば、水平歩行時の $\triangle EE$ ($J/kg \cdot m$) は、Dailey と Hobbs (1989) が報告した Mountain goat (*Oreamnos americanus*) と Bighorn sheep (*Ovis canadensis*) の報告値が最も高いとされている。本研究においても、EE 比推定式を得るために利用した文献値の最大および最小歩行傾斜角度は Dailey と Hobbs (1989) であったため、その値が EE 比推定式に大きな影響を及ぼしている可能性が考えられた。そこで、Dailey と Hobbs (1989) の文献値を除いた EE 比推定式を求め、比較を行った結果、両式に差は見られず、Dailey と Hobbs (1989) の文献値の影響は小さいと考えられた。一方、Dailey と Hobbs (1989) の文献値を利用することにより、EE 比推定式の決定係数が上昇し、適用可能な有蹄動物種が増加するため、Dailey と Hobbs (1989) の文献値は EE 比推定式を得る際に必要であると考えられた。以上より、本研究の EE 比推定式は、水平佇立時の EE が既知であれば、有蹄動物においては種を越えた EE の推定を可能とする一般式となることが示唆された。

本研究において得られた EE 比推定式は、単回帰式の切片と傾きを検定した結果、歩行傾斜角度が -15 度および -10 度において Brockway と Boyne(1980) による Δ EE の推定式を基に算出した EE 比と比較して妥当な値を示す式であると考えられた (図 2.3). ただ一方で、検討に用いた値の中で、歩行速度が 20 m/分で歩行傾斜角度が -10 度の条件および歩行速度が 80 m/分で歩行傾斜角度が -15 度の条件では、本研究の EE 比推定式から算出した値は Brockway と Boyne (1980) による Δ EE の推定式を基に算出した EE 比より過小評価する傾向にあった (図 2.3). しかしながら、これら両条件における Δ EE の実測を Brockway と Boyne (1980) も行っておらず、また、本研究の EE 比推定式を歩行傾斜角度について偏微分すると -7.2 度で EE 比の最小値を示すことから、今後、EE 比推定式の精度を向上するためには、歩行傾斜角度 -7 度 ~ -15 度までの EE 測定データの蓄積が必要であることが示唆された。また、本研究における供試牛の歩行速度は 5.2 m/分以下が約 75% を占めていた。一方、本研究で EE 比推定式作成に利用した文献値の歩行速度は 10.02 m/分から 90.00 m/分であり、両者の歩行速度にずれが生じていた。したがって、今後、EE 推定式の適用歩行速度域を拡大し、より確実な放牧牛の EE 推定を行うために、低速歩行時の EE 測定データの蓄積が必要であることが示唆された。

本研究で得られた推定式による耕作放棄地放牧牛の EE は約 900 \sim 950 kJ/kg^{0.75} \cdot 日であり、日本飼養標準 (農業・食品産業技術総合研究機構 2009) を基に算出した維持に必要な代謝エネルギー要求量 468 kJ/kg^{0.75} \cdot 日の約 2 倍であった。Osuji (1974) は総説の中で、放牧牛の EE は舎飼い時の 150 \sim 200% に、また、Cañas ら (2003) は同様に 203 \sim 248% に増加すると報告しており、本研究の結果は両者の報告と一致した。本研究で推定した EE の場合、供試牛の体重を 600 kg として日本飼養標準 (農業・食品産業技術総合研究機構 2009) に基づき計算すると、供試牛は体重維持のために乾物で 1 日あたり 10 kg 程度

の草を採食したことになる。これに対し、多くの先行研究 (Hull ら 1957; Wagner ら 1986; Schauer ら 2005; Aharoni ら 2009) において放牧牛の 10 kg 程度の食草が報告されているため、本研究においても採食可能な量であると考えられた。また、本研究の試験地における放牧期間中の草量は、春から夏にかけてスプリングフラッシュにより増加し、初秋から晩秋にかけて減少が見られた。供試牛の体重は草量の増減に伴って若干の変動が見られたが、2 頭共に入牧時と退牧時の体重差がほぼ見られなかったため、試験地には体重維持に必要な草量が存在していたと考えられた。一方、本研究と同様の季節における放牧牛の EE を心拍測定を基に推定した Brosh ら (2006b) の報告値を、本研究の結果との比較のために、飼料エネルギーの代謝率を 0.5 と仮定し、維持のためのエネルギー利用効率を求めることで代謝エネルギーに換算すると、初夏では $701 \text{ kJ/kg}^{0.75} \cdot \text{日}$ 、初秋では $773 \text{ kJ/kg}^{0.75} \cdot \text{日}$ であった。同様に Aharoni ら (2009) らは、初夏では $668 \text{ kJ/kg}^{0.75} \cdot \text{日}$ 、初秋では $763 \text{ kJ/kg}^{0.75} \cdot \text{日}$ と報告している。両者の報告と比べ、本研究における EE は約 1.3 倍の値であったが、本研究の EE が高かった要因として、本研究の試験地が Brosh ら (2006b) および Aharoni ら (2009) の試験地よりも厳しい地形条件であったことが挙げられる。本研究の試験地は山林地を含んでおり、試験地の平均傾斜角度が 17 度であるのに対し、Brosh ら (2006b) および Aharoni ら (2009) の試験地は、傾斜が 6 度未満の緩傾斜丘陵地であった。このような試験地の地形条件の違いが、本研究における EE が高い値となったことに影響していたと考えられる。

また、ウシの佇立時の EE について Fries と Kriss (1924) は伏臥時の 131% に、Vercoe (1973) は 118.7% に増加したと報告している。本研究では歩行速度が 1.3 m/分未満はすべて佇立と仮定したが、実際には佇立と仮定した中に伏臥時間も含まれており、そのことが本研究の EE 推定値に影響した可能性も考えられた。これらの要因については、今後、放牧牛の行動を詳細に分類すること

によって検討する必要がある。

放牧牛の一日あたりの歩行距離は 3～6 km とされている（石井 1986）。本研究の歩行距離は約 3.4～4.3 km であり，妥当な移動距離と考えられた。また，歩行距離は季節を経るにつれて減少した。Brosh ら（2006a）は，春以降季節を経るにつれて放牧牛の歩行距離が減少したと報告し，また Hesse ら（2008）も同様に春から秋にかけて放牧牛の歩行距離が減少したと報告しており，本研究の結果はこれらの報告と一致していた。一方，本研究の平均歩行傾斜角度は，季節を経るにつれて急になった。Aharoni ら（2009）は，春から秋にかけて放牧牛の鉛直方向の移動が増加したと報告しており，本研究の結果はこれと同様の傾向であった。また，守屋ら（2003）は，林内放牧牛は夜間に高台で休息し，昼間に低地へ移動して飲水や採食を行うという行動パターンを報告している。本研究において高台は急傾斜地であったため，季節と共に日照時間が短くなるにつれて平均歩行傾斜角度が急になったと考えられた。しかしながら，供試牛の空間的な利用パターンをより詳細に把握するには，行動圏解析（杉本ら 2005）も行う必要があると考えられた。

本研究では，これまでに報告された複数の文献値を利用し，下り歩行を含めた EE 比推定式 $Y = 0.720445 + 0.022516S + 0.142664G + 0.009914G^2$ を得た。この EE 比推定式は 6 種の有蹄動物の文献値から構成されているにも関わらず，決定係数 R^2 が 0.85 という高い値であった。したがって，本研究の EE 比推定式は，水平佇立時の EE が既知であれば，有蹄動物において種を越えて EE の推定を可能とする一般式となることが示唆された。また，EE 比推定式の精度向上には，歩行速度の低速条件下および歩行傾斜角度が -7 度～-15 度までの条件下における EE 測定試験データの蓄積が今後必要であると考えられた。

本研究において推定された耕作放棄地放牧牛の EE は 900～950 kJ/kg^{0.75}・日程度であった。地形条件が厳しい中山間地域で放牧を行う際には，舎飼い時の

2 倍程度エネルギーを消費していることが考えられるため、放牧牛の体重維持には補助飼料の給与を検討する必要があることが示された。

第3章 GPS および GIS を用いた放牧牛の耕作放棄地における空間的利用パターンとそのエネルギー消費量との関係

3.1 緒言

近年,わが国では,特に中山間地域において耕作放棄地面積が増加しており,農業における大きな問題のひとつとなっている. その問題を解決するための有効な手段のひとつとして,耕作放棄地におけるウシの放牧が期待されている. しかしながら,耕作放棄地の多くは地形条件が厳しく,粗飼料源である野草は季節によってその植生に変化が生じることが知られている. また,放牧地の斜度や植生は放牧牛の利用領域に影響を及ぼす(Vallentine 2001)ことから,このような耕作放棄地でウシを放牧する場合,放牧牛の利用領域に偏りが生じる可能性が考えられる.放牧牛は放牧地の植生および生態系に影響を及ぼし(Cooperら 2008),とりわけ,特定場所の過剰利用は,草地の裸地化,土壌の踏み固めおよび表土流出,糞尿の集中による土壌および水系の汚染といった問題を引き起こす可能性があると指摘されている(杉本ら 2005; Hessleら 2008). したがって,耕作放棄地でのウシの放牧を適切に管理するには,放牧牛の行動圏(ある個体が採食・繁殖・子育てに通常利用する場所(Burt 1943))を把握することが必要である(Baileyら 1996; Parsonsら 2003; 杉本ら 2005).

これまで,わが国の耕作放棄地におけるウシの放牧に関する研究はいくつか報告されている(小山ら 2004; 千田 2006)が,これらは,耕作放棄地の草量や経営的評価に関する研究であり,耕作放棄地内での放牧牛の行動に関する研究は数少ない. その中で第2章では,季節を経るにつれて耕作放棄地の放牧牛の歩行距離が減少し,急傾斜角度での歩行が多くなったが,放牧牛の歩行速度および歩行傾斜角度から推定したエネルギー消費量(EE)は季節間で変化しなかったことを示した. しかしながら,第2章では放牧牛の行動圏は推定されて

おらず，実際に放牧牛の利用領域と EE との関係が季節によってどのように変化するのかを明らかにするためには，放牧牛の行動圏を推定し，行動圏と EE との関係を解析する必要があると考えられる．

行動圏の推定には，行動圏内の動物の存在確率に関する情報である利用分布を考慮することが重要であると指摘されている (Anderson 1982; Don と Rennolls 1983; 尾崎と工藤 2002)．利用分布を推定することで，行動圏内を利用強度別に分類し，利用強度の違いによる放牧家畜の土地利用パターンを解析することにより，放牧家畜の空間的利用パターンを把握することが可能となる．

本研究の目的は，GPS と GIS を利用して，耕作放棄地に放牧されているウシの利用強度別での利用領域の面積および平均斜度を解析し，放牧牛の空間的利用パターンを把握すること，および放牧牛の空間的利用パターンと EE との関係を解析することである．

3.2 材料および方法

3.2.1 試験地および供試牛

本研究では，京都府綾部市の耕作放棄地を含む地域（面積 3.34 ha，N：35° 20' 14.79" ～35° 19' 59.21"，E：135° 11' 54.68" ～135° 12' 05.96"，標高：50 m～100 m，平均傾斜角度：17 度）を試験地とした（図 2.1）．試験地は，標高が高くスギとタケが優占した急傾斜地を含む山地と，標高が低く野草が茂る休耕田および植林地等の平坦地から構成されている．山地の優占草種は，コナスビ，ツボスミレ，オオアレチノギク，セイタカアワダチソウ，フユイチゴおよびササであり，平坦地の優占草種は，チガヤ，ススキ，ヒエ，カラスノエンドウ，チドメグサ，ヘビイチゴおよびイグサであった（太田ら 2009）．試験地の中央東部の平坦部には，補助飼料を給与する施設があり，試験地の中央部には水路がある．また，試験地の外周は電気牧柵で囲まれている．供試牛には，

2008年4月16日から同年11月7日まで連続放牧されていた黒毛和種老廃雌牛2頭（11歳齢：入牧時470 kg，退牧時483 kg；12歳齢：入牧時586 kg，退牧時582 kg）を用いた。供試牛2頭ともに放牧経験豊富であり，そのうち1頭は前年の2007年にも本試験地での放牧を経験している。放牧期間中，補助飼料として1日1頭あたり1 kgの米ぬかを毎朝夕に半量ずつ給与した。また，水とミネラルブロックは自由摂取とした。

3.2.2 調査概要

2頭の供試牛にそれぞれGPS首輪（Lotek GPS2200 および 3300; Lotek Wireless Inc., Newmarket, Canada）を装着し，2008年6月18日から7月3日（初夏），同年9月4日から9月19日（初秋）および同年10月23日から11月6日（晩秋）の3期間，終日の位置情報を取得した。GPSの測位間隔は試験期間を通して5分に設定した。

3.2.3 気象データ

本研究の分析に，試験地より西方8 kmに位置する福知山地域気象観測所にて測定された降水量のデータ（気象庁観測部 2008）を用いた。また，国立天文台天文情報センター暦計算室（2008）にて提供されている日出・日没時刻を利用した。

3.2.4 GPSデータおよび試験地地理情報の加工

取得したGPSデータおよび試験地地理情報の加工や統合にはGISフリーソフトウェアのIlwis3.4（International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands）を用いた。取得したGPSデータをGISに取り込み，その緯度および経度をUniversal Transverse Mercator(UTM)

座標系に変換した。また、GIS上で試験地周辺の等高線図から試験地の Digital Elevation Model (DEM) 画像を作成し、それを用いて GPS で取得した各測位点の標高データを抽出した。さらに、試験地 DEM 画像上の各ピクセルにおける斜度を算出することで、試験地の土地の斜度を求めた。

標高データを加えた GPS データを各試験日(日出から翌日の日出)の昼間(日出から日没)および夜間(日没から翌日の日出)に分割した。これらの GPS データのうち、欠損データおよび試験地外を測位したデータは、分析データから除いた。また Swain ら(2008)の報告に従い、供試牛の歩行速度の上限を 36 m/分とし、後述する算出歩行速度がこの上限を超える GPS データは分析データから除外した。分析に用いた各季節の昼間および夜間の時間および GPS データ数の平均値を表 3.1 に示す。

Table 3.1 Mean durations of daytime and nighttime and mean numbers of global positioning system (GPS) data used for analyses

		Mean duration (hours)	Mean numbers of GPS data	
			Cow 1	Cow 2
June	DT ¹⁾	14.5	149	-
	NT ¹⁾	9.5	95	-
September	DT	12.5	102	118
	NT	11.5	91	109
October	DT	10.8	91	107
	NT	13.2	98	108

¹⁾ DT: daytime (from sunrise to sunset), NT: nighttime (from sunset to sunrise following morning)

3.2.5 固定カーネル法を用いた利用分布の推定および各利用強度域の面積と平均斜度の算出

本研究では、供試牛の利用分布の推定に固定カーネル法を用いた。カーネル法は、各観察点に一山型の2変量確率密度関数をかぶせ、それらの確率密度を足し合わせていくことによって、存在確率を推定する方法である。固定カーネル法を用いた利用分布の推定は、Mitchell (2006) の報告を参考にして行った。観察点として各試験日の昼間と夜間に分割した GPS データを用いて、Seaman ら (1998) が開発したフリーソフトウェア KERNELHR (Illinois Natural History Survey, Ecology Software, USA) により 10 m グリッド間の存在確率を推定した。得られたデータを Ilwis3.4 に取り込み、10 m グリッド間の存在確率を Ordinary Kriging 法によって内挿した。これにより、10 m グリッド間の点在した存在確率データを面での存在確率データに拡張し、試験地における供試牛の利用分布を推定した (図 3.1a)。利用分布から推定する行動圏は、ある割合の存在確率が含まれる最小の範囲として示され (Anderson 1982)、慣例的に存在確率の含まれる割合を 95% と設定した場合、一時的にしか動物が存在しない領域を除くことができる。さらに、存在確率が含まれる割合を低くすることにより、休息や採食の中心となる利用強度の高い利用集中域 (Kaufmann 1962) を推定することが可能である (Samuel ら 1985; 尾崎と工藤 2002)。本研究では、利用強度に応じた行動圏を解析し、供試牛の空間的利用パターンを把握する目的から、利用強度が高い領域として 25% 行動圏 (高利用強度域)、利用強度が中程度の領域として 50% 行動圏から 25% 行動圏を除いた行動圏 (中利用強度域) および利用強度が低い領域として 95% 行動圏から 50% 行動圏を除いた行動圏 (低利用強度域) を設定し (図 3.1b)、試験地において各利用強度域に推定された領域の面積および平均斜度を算出した。

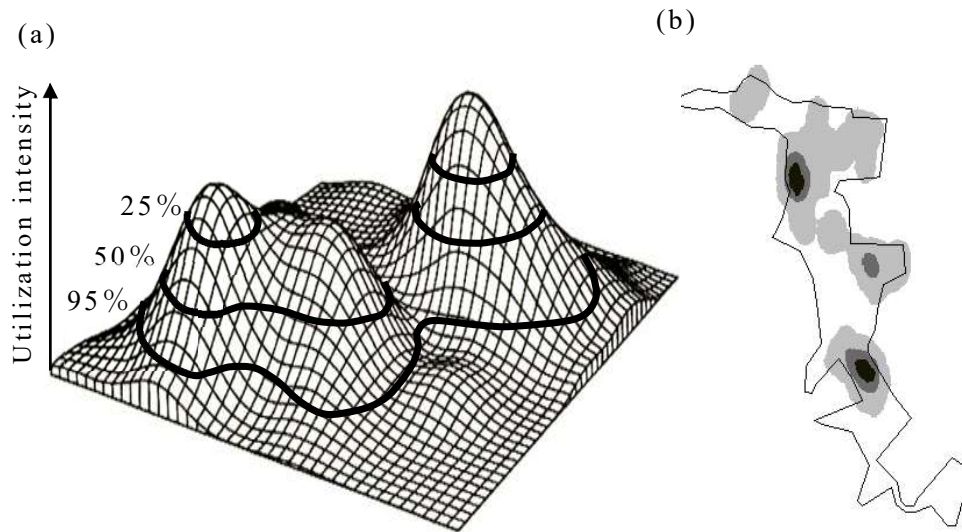


Figure 3.1 Image diagram showing utilization distribution (a) and an example of estimated three levels of intensity utilization area. Black, dark-gray, and light-gray areas show high, middle, and low intensity utilization areas, respectively.

3.2.6 供試牛のエネルギー消費量の推定

各試験日の昼間と夜間に分割した GPS データを用いて、各測位点間の 2 次元における距離および標高差を UTM 座標および標高データからそれぞれ算出し、それらから 3 次元での歩行距離および歩行傾斜角度をそれぞれ算出した。また、歩行速度は歩行距離を測位間隔時間で除して求めた。歩行速度の下限は、八木ら (1983) の報告に従って、1.3 m/分とし、これより遅いデータは佇立と仮定した。歩行速度および歩行傾斜角度のデータから第 2 章で作成した EE 比推定式を用いて EE 比を求めた。さらに、求めた EE 比に日本飼養標準 (農業・食品産業技術総合研究機構 2009) を基に算出した測位間隔時間あたりの維持代謝エネルギー要求量を乗じて EE を算出した。

3.2.7 統計解析

本研究で取得した初夏の GPS データは、GPS 首輪の不具合により、供試牛 1 頭分のみであった。そこで、予備的な解析として 2 頭分のデータがそろった初秋と晩秋のデータを用い、供試牛の効果の検定を行った結果、高利用強度域および中利用強度域の面積において供試牛の効果が有意であったため、下記の分散分析は供試牛ごとに行った。

各利用強度域の面積および平均斜度に対して、昼夜別、季節および降雨量が及ぼす影響について、以下の数学モデルにより、SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC) の GLM プロシジャを用いて分散分析を行った。

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + T_j + (ST)_{ij} + \alpha R_{ijk} + e_{ijk} \quad (1)$$

ここで、 Y_{ijk} : 各試験日の昼間および夜間における各利用強度域の面積あるいは平均斜度、 μ : 全平均、 S_i : 季節の効果、 T_j : 昼夜別の効果、 $(ST)_{ij}$: 季節と昼夜別の交互作用、 R_{ijk} : 降雨量の共変量効果、 α : 降雨量の偏回帰係数、 e_{ijk} : 誤差である。また最小二乗平均値間の差の検定は、Tukey と Kramer の多重比較

法 (Kramer 1956) により行った。

さらに各利用強度域の面積あるいは平均斜度と EE との間の相関分析を SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC) の CORR プロシジャを用いて行った。

3.3 結果および考察

Seaman ら (1999) は、固定カーネル法を用いて利用分布の推定を行う場合には、50 データ以上を用いることを勧めている。本研究では、日出から日没までを昼間とし、また、日没から翌日の日出までを夜間としたため、昼夜間および季節間で利用分布の推定に用いるデータ数が異なったが、いずれの季節の昼夜においても利用分布の推定に 50 データ以上を用いたため、各利用強度域の面積および平均斜度に対する昼夜間および季節間の比較は可能であると考えられた (表 3.1)。

各季節の昼夜における各利用強度域の面積と平均斜度、および EE の平均値は表 3.2 に示すとおりである。各利用強度域の面積については、昼間の方が夜間に比べて広い傾向にあった。一方、平均斜度については、夜間の方が昼間に比べて急であり、また、季節を経るにつれて急になる傾向が見られた。EE については、初秋および晩秋において、昼間に比べ、夜間の方が高かった。Linnane ら (2001) は、季節を経るにつれて、放牧牛の夜間における採食時間が増加することを報告している。本研究においても同様であったと仮定すると、夜間に急傾斜地での採食時間が増加したことが初秋および晩秋における夜間の EE が高かった要因として考えられた。また、本研究で利用した EE 比推定式は、佇立を歩行中と判断して EE 推定値を過大評価する可能性がある」と第 2 章でも指摘しており、このこともまた夜間の EE が高かった原因のひとつとして考えられた。

Table 3.2 Mean sizes and average slope gradients (ASG) of each intensity utilization area, and mean energy expenditure (EE)

		HIA ¹⁾		MIA ¹⁾		LIA ¹⁾		EE (kJ/kg ^{0.75})
		Size (m ²)	ASG (degree)	Size (m ²)	ASG (degree)	Size (m ²)	ASG (degree)	
June ²⁾	DT ³⁾	260.2	13.46	1143.9	14.71	11992.0	15.07	500.42
	NT ³⁾	137.8	21.67	594.4	20.15	6046.7	20.29	420.69
September	DT	249.7	19.65	997.0	18.75	9920.5	17.18	413.87
	NT	165.0	25.77	632.9	24.64	6092.4	20.00	485.89
October	DT	349.9	19.79	1235.4	18.38	10983.0	17.77	398.88
	NT	71.9	30.00	423.8	29.60	5077.7	22.54	534.50

¹⁾ HIA: high intensity utilization area, MIA: middle intensity utilization area, LIA: low intensity utilization area

²⁾ Each size, ASG, and EE in June were calculated using data of Cow1.

³⁾ DT: daytime (from sunrise to sunset), NT: nighttime (from sunset to sunrise following morning)

各利用強度域の面積および平均斜度に、昼夜別、季節および降雨量が及ぼす影響を調べた分散分析の結果を表 3.3 に示す。すべての利用強度域の面積において、両供試牛共に季節間差は認められなかった。一方、供試牛 1 の高利用強度域および中利用強度域の平均斜度は、季節を経るにつれて急傾斜になる傾向が認められた。また、低利用強度域の平均斜度においても、有意ではなかったものの、季節を経るにつれて急傾斜になる傾向が見られた。供試牛 2 の結果には初夏のデータが欠けているが、初秋から晩秋にかけて急傾斜となる傾向が見られた。第 2 章において、放牧牛の平均歩行傾斜角度は、季節を経るにつれて急になったことを示したが、本結果は第 2 章の結果を支持するものであった。さらに、先行研究 (Roath と Krueger 1982; Hall 1988; Howery ら 1996) において、放牧期間が進むにつれて、放牧牛は平地の低地から急傾斜の高地を利用するようになったことが報告されており、本研究の結果はこれらの報告と一致した。

両供試牛のすべての利用強度域において、夜間に比べて昼間の方が面積は広く ($P < 0.01$)、また、平均斜度は緩やかであった ($P < 0.01$)。したがって、供試牛は夜間に比べて昼間に緩傾斜の地域に広く分布し、夜間は昼間に比べて急傾斜の地域に留まっていることが示唆された。杉本ら (2005) は、林内放牧牛の行動圏の推定を行い、昼間の行動圏面積の方が夜間の行動圏面積よりも広いことを報告している。また、守屋ら (2003) は、林内放牧牛は、昼間は低地へ移動して飲水や採食を行い、夜間は高台の休息場所にほとんどどまっているという行動パターンを報告しており、本研究の結果はこれらの報告と一致していた。

降雨量の効果は、供試牛 1 では中利用強度域と低利用強度域で、供試牛 2 ではすべての利用強度域で有意であり、降雨量の増加に伴って利用強度域が広がることを示された (供試牛 1: $P < 0.05$; 供試牛 2: $P < 0.01$)。降雨の効果について先行研究では、降雨時、放牧牛の活動は抑制され、歩行距離、採食および横

臥時間が減少し、佇立時間が増加することが報告されている(大野と田中 1965; Gonyou と Stricklin 1984; 守屋ら 2003)。しかしながら、本研究では、中利用強度域および低利用強度域の面積において、降雨量の増加に伴い面積が広がったため、供試牛の活動が活発となった可能性が考えられた。Rutter (1968)によると、降雨はその降雨後の採食を促し、放牧牛の活動を活発にするとされており、このことが本研究で降雨量の増加に伴い面積が広がった要因のひとつと考えられた。

本研究では、昼夜別と季節の交互作用は、供試牛 1 では高利用強度域および中利用強度域の面積において有意性が認められ(表 3.3)、また供試牛 2 では有意水準に近い値であった(高利用強度域: $P=0.07$; 中利用強度域: $P=0.06$)。これらの結果から、晩秋における昼間の高利用強度域および中利用強度域の面積は他の季節よりも広いことが明らかとなった。安江と佐藤(2005)は、秋における餌資源の量および質の低下に伴い、放牧牛は移動せずに首の動きだけで採食可能な範囲での草の食いちぎり回数を増加させ、それまでの移動型から滞在型の採食行動に変更すると指摘している。滞在型では採食行動を行った地域の利用強度は移動型より高く推定されると考えられ、また、滞在型では高利用強度域の面積が広がると考えられた。したがって、本研究において、晩秋の昼間の高利用強度域 および中利用強度域の面積が他の季節よりも広がった要因のひとつとして、安江と佐藤(2005)の指摘と同様の採食行動の変更が起きたことが考えられた。

Table 3.3 Results of least squares analysis of variance for size and average slope gradients (ASG) of each intensity utilization area estimated from the GPS data by daytime or nighttime of each experimental day

	Size (m ²)		AGS (degree)	
	Cow1	Cow2	Cow1	Cow2
HIA¹⁾				
Season				
June	197.2 ± 38.9 ³⁾	-	17.41 ± 1.54 ^A	-
September	247.3 ± 38.3	159.1 ± 27.3	22.40 ± 1.36 ^B	23.05 ± 1.53
October	261.9 ± 40.1	170.8 ± 28.4	24.75 ± 1.62 ^B	25.46 ± 1.91
Time				
DT ²⁾	308.8 ± 31.9 ^b	257.1 ± 27.8 ^b	17.64 ± 1.15 ^a	19.48 ± 1.53 ^a
NT ²⁾	162.1 ± 32.0 ^a	72.8 ± 27.8 ^a	25.40 ± 1.31 ^b	29.03 ± 1.91 ^b
Season×Time	P<0.05	N.S.	N.S.	N.S.
Precipitation	N.S. ⁴⁾	P<0.01	N.S.	N.S.
MIA¹⁾				
Season				
June	834.8 ± 82.9	-	17.42 ± 1.23 ^a	-
September	911.8 ± 81.7	708.2 ± 64.1	21.00 ± 1.20 ^{ab}	22.28 ± 0.95
October	978.1 ± 85.5	728.6 ± 66.5	24.51 ± 1.25 ^b	23.59 ± 1.01
Time				
DT	1175.6 ± 68.0 ^b	993.8 ± 65.2 ^b	17.56 ± 0.99 ^a	18.04 ± 0.97 ^a
NT	640.9 ± 68.1 ^a	443.0 ± 65.3 ^a	24.40 ± 1.01 ^b	27.84 ± 0.99 ^b
Season×Time	P<0.05	N.S.	N.S.	N.S.
Precipitation	P<0.05	P<0.05	N.S.	N.S.
LIA¹⁾				
Season				
June	8791.6 ± 554.7	-	17.66 ± 0.88	-
September	8569.6 ± 546.8	7322.3 ± 526.3	18.72 ± 0.87	18.44 ± 0.69
October	8562.5 ± 572.1	7874.1 ± 546.5	20.40 ± 0.91	19.95 ± 0.72
Time				
DT	11361.8 ± 455.3 ^b	9532.2 ± 534.2 ^b	16.85 ± 0.73 ^a	17.81 ± 0.70 ^a
NT	5920.6 ± 455.7 ^a	5664.2 ± 534.6 ^a	21.01 ± 0.73 ^b	21.21 ± 0.70 ^b
Season×Time	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Precipitation	P<0.05	P<0.01	N.S.	N.S.

¹⁾ HIA: high intensity utilization area, MIA: middle intensity utilization area, LIA: low intensity utilization area

²⁾ DT: daytime (from sunrise to sunset), NT: nighttime (from sunset to sunrise following morning)

³⁾ Least squares means with standard errors

⁴⁾ N.S.: not significant

^{A,B,a,b}: LSMeans within a column in each effect with different superscripts significantly differ (^{A,B}: P<0.05, ^{a,b}: P<0.01).

各季節における各利用強度域の面積と EE との間の相関係数を表 3.4 に、また、各利用強度域の平均斜度と EE との間の相関係数を表 3.5 に示す。なお表 3.5 について、供試牛 2 の晩秋夜間における高利用強度域において高い負の相関係数が得られた ($r=-0.76$) が、このことは分析に用いたデータ数が 6 データと少なかったためと思われる。

低利用強度域の面積と EE との間には、すべての季節において相関関係は有意ではなかった (表 3.4)。この原因として、EE の増加に影響を及ぼす歩行距離が低利用強度域の面積に反映されにくいことが考えられた。一方、低利用強度域の平均斜度と EE との間には、晩秋の夜間を除いて、有意な正の相関関係があった (表 3.5)。これは、低利用強度域は、高利用強度域および中利用強度域に比べ、供試牛の移動を伴う活動が頻繁に行われていることによると考えられた。

初夏の昼間において、いずれの利用強度域でも平均斜度と EE との間に正の強い相関関係が認められたが、初秋および晩秋の昼間の高利用強度域および中利用強度域では、そのような相関関係は認められなかった (表 3.5)。このような結果は、初夏の昼間における各利用強度域の平均斜度は、利用強度が低くなるにつれて急になり (表 3.2)、供試牛は試験地内の低地を主に利用し、そこから山地の裾野といったやや傾斜が急な地域まで上ることで利用領域を広げるといった空間的利用パターンを示したためと考えられた。一方、初秋および晩秋の昼間における各利用強度域の平均斜度は、利用強度が低くなるにつれて緩やかになる傾向が見られ (表 3.2)、供試牛は急傾斜地域を主に利用し、そこから緩傾斜地域まで下ることで利用領域を広げるという初夏とは逆の空間的利用パターンを示したと考えられる。この場合、利用領域を広げるために行ったのは下り歩行であり、第 2 章で指摘したように、下り歩行の方が上り歩行に比べ EE が低く、それゆえ EE の増加に影響を及ぼさなかったと推察される。

初夏の夜間において各利用強度域の平均斜度と EE との間に正の強い相関関係が認められた（表 3.5）。供試牛は初夏において初秋および晩秋よりも低地の緩傾斜地を利用集中域として利用していた（初夏：14 夜中 4 夜，初秋：14 夜中 1 夜，晩秋：13 夜中 1 夜）。そのため，初夏の夜間における平均斜度に変化が生まれ，平均斜度と EE との間に正の強い相関関係が認められたと考えられた。

一方，初秋および晩秋の夜間においては，平均斜度と EE との間の相関関係が認められなくなり，面積と EE との間の相関関係が認められるようになった（表 3.4 および表 3.5）。これは，供試牛は低地の緩傾斜地を利用集中域として利用しなくなり，山地の急傾斜地を主に利用していたためと推察された。

晩秋の夜間においては，各利用強度域の面積と EE との間は正の相関関係であった（表 3.4）が，これは，供試牛が試験地に存在する山地の山頂付近の急傾斜地域を主に利用していたため，平均斜度の変化が少なく，EE の増減に平均斜度ではなく面積が影響したことによると考えられた。

一方，初秋の夜間では，各利用強度域の面積と EE との間は負の相関関係であった（表 3.4）。これは，初秋の夜間において，供試牛は利用集中域として山地の中腹部を利用し，そこからより急傾斜地域まで上って小範囲で利用した場合と，利用集中域の山地の中腹部から緩傾斜地域まで下って広く利用した場合と試験日によって 2 種の空間的利用パターンを示し，後者に比べ，前者の EE の方が高かったことによると推察された。

Table 3.4 Correlation coefficients between energy expenditure and size of each intensity utilization area

		HIA ¹⁾	MIA ¹⁾	LIA ¹⁾
June ³⁾	DT ²⁾	0.27	0.26	0.24
	NT ²⁾	0.49	0.45	0.28
September ³⁾	DT	-0.31	-0.29	0.01
		(-0.45 , -0.11) ⁴⁾	(-0.32 , -0.26)	(0.13 , -0.20)
October ³⁾	NT	-0.64**	-0.50**	-0.33
		(-0.69** , -0.01)	(-0.57* , 0.17)	(-0.36 , -0.34)
October ³⁾	DT	0.45*	0.36	-0.06
		(0.25 , 0.72**)	(0.12 , 0.70**)	(-0.37 , 0.31)
	NT	0.59**	0.60**	0.36
		(0.71** , 0.59*)	(0.64* , 0.60*)	(0.48 , 0.28)

¹⁾ HIA: high intensity utilization area, MIA: middle intensity utilization area, LIA: low intensity utilization area

²⁾ DT: daytime (from sunrise to sunset), NT: nighttime (from sunset to sunrise following morning)

³⁾ Correlation coefficients in June were calculated using data of Cow1 and those in September and October were calculated using data of both Cow1 and Cow2.

⁴⁾ Values in parentheses show correlation coefficients calculated using data of Cow1 (left) or Cow2 (right).

*: P<0.05, **: P<0.01

Table 3.5 Correlation coefficients between energy expenditure and average slope gradients (ASG) of each intensity utilization area

		HIA ¹⁾	MIA ¹⁾	LIA ¹⁾
June ³⁾	DT ²⁾	0.83**	0.83**	0.64*
	NT ²⁾	0.77*	0.83**	0.89**
September ³⁾	DT	0.34	0.36	0.48**
		(0.32 , 0.38) ⁴⁾	(0.47 , 0.18)	(0.45 , 0.55*)
October ³⁾	NT	0.14	0.30	0.51*
		(0.17 , -0.09)	(0.50 , -0.39)	(0.63* , 0.42)
October ³⁾	DT	0.26	0.41*	0.75**
		(0.41 , 0.11)	(0.38 , 0.48)	(0.83** , 0.65*)
	NT	-0.14	-0.14	-0.03
		(0.22 , -0.76)	(-0.20 , -0.07)	(-0.19 , 0.12)

¹⁾ HIA: high intensity utilization area, MIA: middle intensity utilization area, LIA: low intensity utilization area

²⁾ DT: daytime (from sunrise to sunset), NT: nighttime (from sunset to sunrise following morning)

³⁾ Correlation coefficients in June were calculated using data of Cow1 and those in September and October were calculated using data of both Cow1 and Cow2.

⁴⁾ Values in parentheses show correlation coefficients calculated using data of Cow1 (left) or Cow2 (right).

*: P<0.05, **: P<0.01

第 4 章 放牧牛の吸血昆虫対策技術の開発

4.1 緒言

シマウマはその体表に明瞭な白色と黒色の縞模様がある。その縞模様の機能について科学的に様々な仮説が提唱されており、その仮説として代表的なものに、背景と同化するカムフラージュという説、捕食者に各個体として認識させるべくし混乱させるという説、同種へのシグナルという説、体温調節という説および吸血昆虫を忌避するという説がある (Caro 2016)。これらの仮説の中で、吸血昆虫を忌避するという説が近年の研究で有力とされている。Caro ら (2014) は、種あるいは亜種のレベルで体表に縞模様がある動物種の系統の生息分布が、吸血昆虫であるアブの生息分布と関連していることを報告している。また、Egri ら (2012a) は、トレイ状、板状、球状あるいはバケツ状であっても形に関係なく、吸血昆虫は表面が白黒色の縞模様であるものに付着しにくいということを実験的に示した。さらに、Caro ら (2019) は、ウマに縞模様、黒色あるいは白色の馬服を着せて、それぞれの馬服に付着したアブの数を比較したところ、縞模様が最も少なかったと報告している。一方、上述した吸血昆虫を忌避するという仮説以外の仮説は、これまでのところ実証されていない (Hayward と Kerley 2005; Larison ら 2015; Caro 2016; Hogan ら 2016; Melin ら 2016; Horváth ら 2018)。

白色の単色 (Horváth ら 2010)、縞模様 (Egri ら 2012a; Blahó ら 2013) および斑点模様 (Blahó ら 2012) に吸血昆虫は付着しにくいと先行研究で報告されている。縞模様の縞の幅が約 5 cm より細かい場合、斑点模様では各斑の直径が約 10 cm よりも小さい場合において、効果的に吸血昆虫の付着を防ぐことができるとされ、これらは表面が白色の単色よりも吸血昆虫を寄せ付けにくいことが示されている (Egri ら 2012a; Blahó ら 2012)。

吸血昆虫は家畜にとって害虫であり (Lysyk 1995; Schofield と Torr 2002; Mullens ら 2006), ウシの行動に影響を及ぼし, 経済的な損失を引き起こすとされている (Byford ら 1992; Campbell ら 2001; Taylor ら 2012). 吸血昆虫がウシに群がることにより, 採食や休息行動が減少し, 代わりに吸血昆虫に対する忌避行動 (e.g., 頭振り, 耳振り, 脚踏み, 皮膚の振戦および尾振り) や, ウシが一箇所に群れる行動が増加する (Mullens ら 2006; Taylor ら 2012). この行動により, ウシは暑熱ストレスを受け, また, 吸血昆虫に刺されないように他のウシを押しつけて群がっていくことにより怪我を負う危険性が増す. このように吸血昆虫がウシの行動に影響を及ぼすことによって, 肥育牛では増体の低下, 乳牛では乳生産量の減少につながり, 経済的な損失を招く (Campbell ら 2001; Mullens ら 2006; Taylor ら 2012).

以上から, ウシの体表を白黒色の縞模様にすることにより, ウシに付着する吸血昆虫の数が減り, ウシが行う吸血昆虫忌避行動の回数も減るという仮説が考えられる. この仮説が実証されれば, 家畜の体表を縞模様にする方法は, 家畜生産において殺虫剤を用いず, 環境にやさしい, 実践的かつ新しい吸血昆虫対策となり得る. そこで本研究では, ウシの体表をシマウマ様の縞模様に塗装し, ウシの体表に付着する吸血昆虫数および吸血昆虫忌避行動回数に及ぼす影響を調査することを目的とした. 本研究は, 著者らの知る限り, 生体の動物にシマウマ様の縞模様を施し, その効果を検証する初めての研究であると考えられる.

4.2 材料および方法

本研究は, 愛知県農業総合試験場動物実験等実施規定に基づいて実施した (承認番号: 29-1).

本研究は, 愛知県長久手市の愛知県農業総合試験場において, 2017年8月か

ら 9 月および 2018 年 10 月に実施した。本試験実施時の平均気温は、2017 年においては 10 時から 12 時が 30.4 ± 1.7 °C、13 時から 15 時が 31.1 ± 1.8 °C、2018 年においては 10 時から 12 時が 20.1 ± 2.2 °C および 13 時から 15 時が 20.4 ± 1.4 °C であった。供試牛には黒毛和種経産妊娠牛 6 頭（平均体重： 481.3 ± 46.9 kg）を用いた。供試牛は愛知県農業総合試験場内の面積約 1 ha の放牧地（ $35^{\circ}16'N$, $137^{\circ}07'E$ ）に終日放牧されており（2017 年と 2018 年ともに 4 月上旬から 11 月下旬まで）、本試験実施の前年以前も同放牧地での放牧を経験している。放牧期間中は、毎朝 10 時に補助飼料として 1 日 1 頭あたり 0.5 kg の濃厚飼料を給与した。また、水とミネラルは自由摂取とした。

黒毛和種は体毛が黒色あるいは黒色にわずかに褐色を帯びているため、白色の水性ラッカーにより白黒色の縞模様にした区（B&W）、黒色の水性ラッカーにより B&W と同様の縞模様にした区（B）および対象区として何も塗料を塗っていない区（CONT）の 3 区を試験区として設定した（図 4.1）。供試牛の縞模様は、市販の水性ラッカー（カラースプレーベーシック；日本ペイント株式会社、東京）を用いて各試験日の朝に施した。また、縞の幅は 5 cm 以内となるようにフリーハンドにより縞模様を施した。水性ラッカーは短期間（3 日程度）で塗料が落ち、供試牛を短期間で他の試験区に配置することが可能であった。供試牛に縞模様を施すのに必要な時間は 1 頭あたり 5 分程度であった。

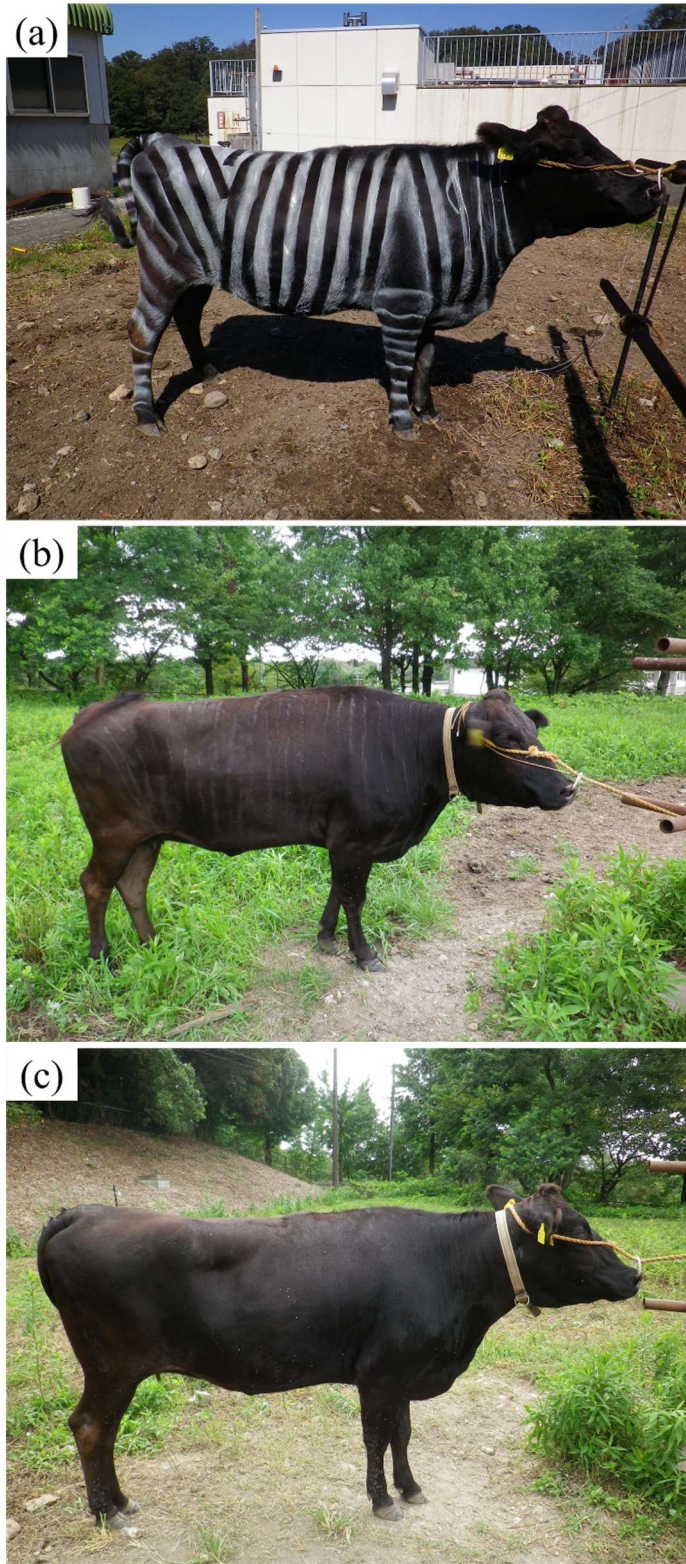


Figure 4.1 Examples of experimental cows with/without painted stripes. (a)Black - and-white striped cattle (B&W) with white lacquer, (b) Black-striped cattle (B) with black lacquer, (c) No stripe cattle (CONT).

本研究は、3×3 のラテン方格法により実施した。試験設計は 2017 年と 2018 年で同様とし、6 頭の供試牛のうち 3 頭を 2017 年の試験に、その他の 3 頭を 2018 年の試験に供試した。同じ個体が両年ともに供試されることはなかった。3×3 のラテン方格法では、1 試験期間を 3 日間とし、合計 9 日間試験を実施した（両年で合計 18 日間）。3 頭の供試牛を重複することなく各試験区に配置し、1 試験期間中に試験区の変更を行うことなく、3 試験期間で各供試牛が全ての試験区に配置されるようにした。各試験日の午前と午後の 2 回、供試牛の行動観察を行った。

各試験日において、補助飼料の給与後に放牧されている供試牛 3 頭を並べてロープで柵に繋いだ。その際、供試牛が頭部を自由に動かせるように十分なロープの長さを確保し、供試牛の並ぶ順番はランダムとした。供試牛を繋いだ後、B&W と B の供試牛にそれぞれ縞模様を施し、その後、供試牛の周辺に残存する水性ラッカーの臭いを無くすため 30 分程度経過してから午前中の観察を行った。供試牛の吸血昆虫忌避行動の観察は、Eicher ら（2001）の方法に従い、1 分間隔でその瞬間行っている忌避行動を記録するスキャンサンプリングとし、観察時間は 30 分間とした。本行動観察および記録は試験期間を通して 1 人の観察者により行い、記録した吸血昆虫忌避行動は、頭振り、耳振り、脚踏み、皮膚の振戦および尾振りの 5 行動とした。行動観察を終えた後、市販のデジタルカメラ（PENTAX Optio RZ10）により各供試牛の右半身を撮影し、体躯部および脚部に付着した吸血昆虫数をカウントした（図 4.2）。写真の解像度は 14 M ピクセル（4288 × 3216 ピクセル）とした。

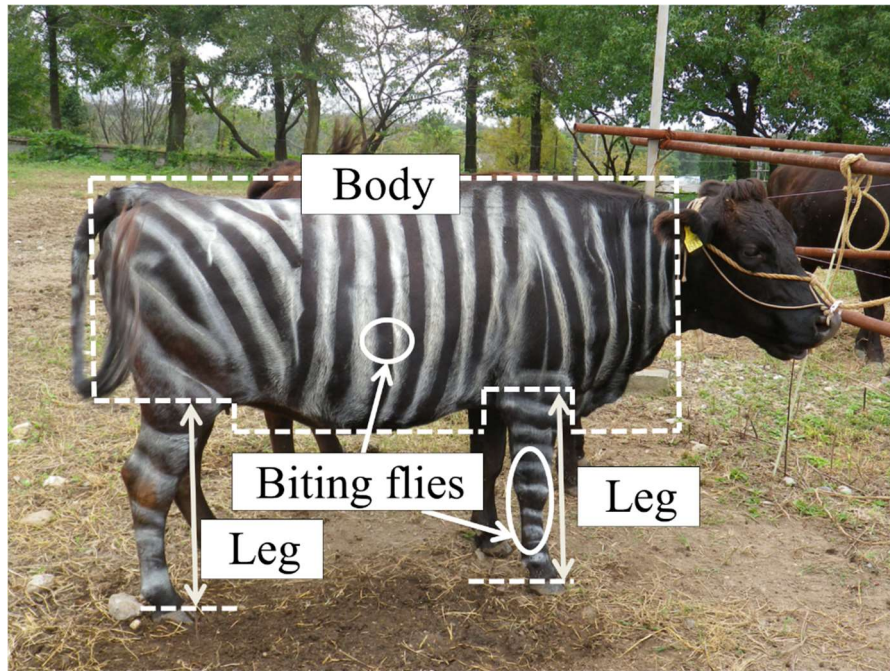


Figure 4.2 Example of the area of legs and body used to count biting flies on cows.

さらに、試験地に存在する吸血昆虫の種を同定するため、透明で無臭の接着剤が塗られたプラスチック製の青色板(40 cm×40 cm)(T-trap; TSET 株式会社, 愛知)を地上に設置し捕獲した。

統計解析は Kaps と Lamberson (2009) に従い、SAS (SAS Inst. Inc., Cary, NC) の MIXED プロシジャを用いて、試験区 (B&W, B および CONT) を母数効果、ラテン方格 (2017 および 2018) およびラテン方格の巣ごもりとして試験期間と個体を変量効果として解析を行った。母数効果の多重比較は、Tukey 法を用いた。従属変数は、付着吸血昆虫数として脚部、体躯部およびそれらの合計数、忌避行動として頭振り、耳振り、脚踏み、皮膚の振戦、尾振りのそれぞれの行動数および 5 行動の合計とした。

4.3 結果

牛体への付着吸血昆虫数および吸血昆虫忌避行動回数に縞模様が及ぼす影響を調べた結果を図 4.3 および表 4.1 に示す。B&W 区の脚部と体躯部に付着した吸血昆虫数およびその合計の吸血昆虫付着数は、CONT 区および B 区に比べて約半数に減少した (B&W VS CONT: $P < 0.0001$; B&W VS B: $P < 0.001$)。一方、CONT 区および B 区の付着吸血昆虫数に有意な差は認められなかった。

本研究で 30 分間のスキャンサンプリングで観察した 5 種の忌避行動 (頭振り、耳振り、脚踏み、皮膚の振戦および尾振り) の合計回数は、B&W 区で 39.8 回であり、CONT 区の 53.0 回および B 区の 54.4 回より約 20% 低い値であった (B&W VS CONT: $P < 0.0001$; B&W VS B: $P < 0.001$)。B&W 区の忌避行動回数が減少した要因として、B&W 区の付着吸血昆虫数が少なかったことが考えられる。なお、頭振り、耳振り、脚踏みおよび尾振りの回数については、B&W 区が CONT 区および B 区よりも少なかった ($P < 0.05$) のに対し、皮膚の振戦の回数は B&W 区の方が CONT 区および B 区よりも多かった ($P < 0.05$)。

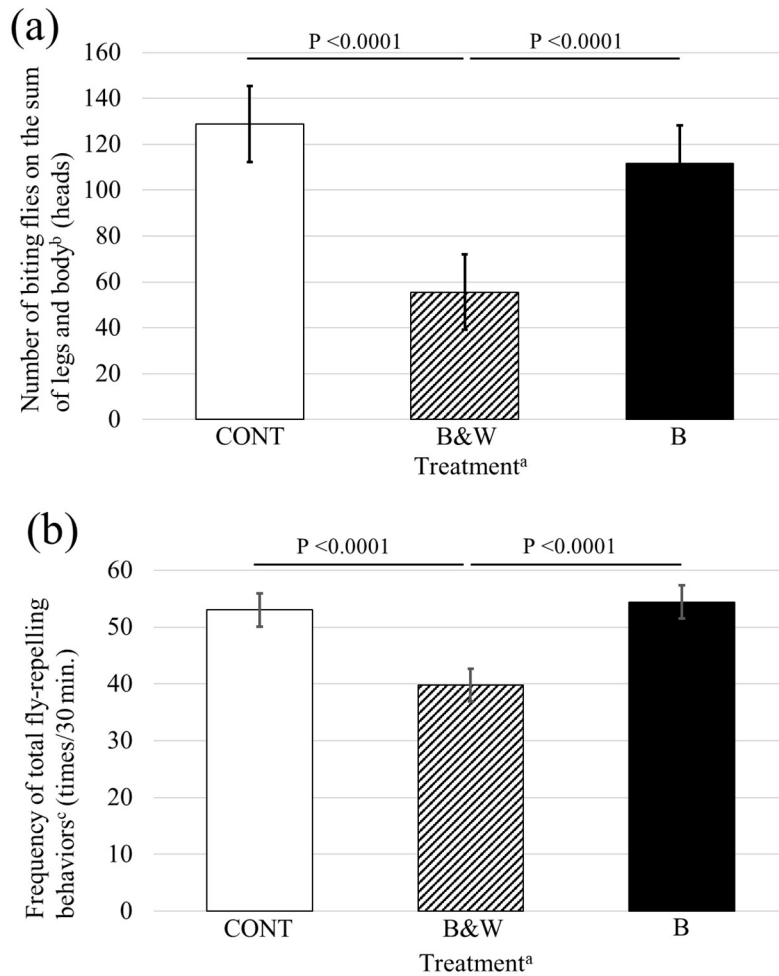


Figure 4.3 Number of biting flies on legs and body (a) and the frequency of total fly-repelling behaviors (b) of the experimental cows

^a CONT: no stripe cattle, B&W: black-and-white striped cattle with white lacquer, which indicates “striped-cattle” indicates “striped-horse (zebra)” in Japanese, B: black-striped cattle with black lacquer.

^b Biting flies trapped by the sticky plastic boards were mainly stable flies (*Stomoxys calcitrans*), a few horn flies (*Haematobia irritans*), and horse flies (*Tabanus sapporoensis*). These flies are popular in Japan (Hayashi et al. 1967; Okumura 1977; Manda et al. 1982; Kondo et al. 1993). The relative abundance of these biting flies were *Stomoxys calcitrans* (77.9%), *Haematobia irritans* (21.5%), and *Tabanus sapporoensis* (0.5%).

^c Head throws, ear beats, leg stamps, skin twitches and tail flicks.

Table 4.1 Numbers of biting flies on the experimental cows and the frequencies of fly-repelling behaviors

	Treatment ^a				Probabilities		
	CONT	B&W	B	s.e.	CONT VS B&W	CONT VS B	B&W VS B
Numbers of biting flies (heads) ^b							
On legs ^c	86.7	40.2	73.1	11.1	<0.0001	0.12	<0.0001
On body ^c	42.1	15.3	38.6	8.0	<0.0001	0.82	<0.001
Frequencies of fly-repelling behaviors (times/30 min.)							
Head throws	2.53	0.89	2.14	0.72	<0.001	0.63	<0.05
Ear beats	13.2	9.0	14.1	1.6	<0.0001	0.66	<0.0001
Leg stamps	7.9	5.1	8.3	1.3	<0.001	0.83	<0.0001
Skin twitches	2.36	3.58	2.44	1.22	<0.05	0.98	<0.05
Tail flicks	27.0	21.2	27.4	1.0	<0.0001	0.92	<0.0001

^a CONT: no stripe cattle, B&W: black-and-white striped cattle with white lacquer, which indicates “striped-cattle” indicates “striped-horse (zebra)” in Japanese, B: black-striped cattle with black lacquer.

^b Biting flies trapped by the sticky plastic boards were mainly stable flies (*Stomoxys calcitrans*), a few horn flies (*Haematobia irritans*), and horse flies (*Tabanus sapporoensis*). These flies are popular in Japan (Hayashi et al. 1967; Okumura 1977; Manda et al. 1982; Kondo et al. 1993). The relative abundance of these biting flies were *Stomoxys calcitrans* (77.9%), *Haematobia irritans* (21.5%), and *Tabanus sapporoensis* (0.5%).

^c See Figure 4.2 in Text.

4.4 考察

全世界的に吸血昆虫はウシの深刻な害虫であり、アメリカ合衆国における吸血昆虫に由来する養牛生産への被害額は 22 億 1100 万ドルにのぼると推計されている (Taylor ら 2012). このような経済的な損失を可能な限り低減するために、ウシの生産現場では殺虫剤を使用するのが一般的である (Oyarzún ら 2008). しかしながら、これまで昆虫は、新たな殺虫剤の使用が開始された後、約 30 年でその殺虫剤への抵抗性を獲得してきている (Palumbi 2001). Hogsette ら (1991) は、吸血昆虫のノサシバエが短期間で数種の殺虫剤の抵抗性を得たことを示しており、そのため、ノサシバエの忌避対策プログラムに殺虫剤入りのイヤータグの使用を推奨しない地域もアメリカ合衆国の中には存在する. 本研究では、白黒色の縞模様をウシに施すことによって、ウシの体表に付着する吸血昆虫数および皮膚の振戦以外の忌避行動回数が減少したことを示した. Mullens ら (2006) は、ウシの吸血昆虫忌避行動を次の 2 種類に分類できると指摘している. 一方は皮膚の振戦や尾振りといった動作の負荷が低く頻繁に行う忌避行動であり、他方は頭振りや脚踏みといった動作の負荷が高く頻繁には行わない忌避行動である. したがって、吸血昆虫による負荷が比較的少ない場合には、ウシは動作負荷の低い皮膚の振戦を行う傾向にある. 本研究では、白黒色の縞模様を施すことによって、B&W 区のウシに対する吸血昆虫の負荷が低く、その結果、CONT 区および B 区よりも頻繁に皮膚の振戦を行ったと推察された. 本研究の結果から、家畜の体表に白黒色の縞模様を施す方法は、殺虫剤に代わる新たな吸血昆虫対策となる可能性があり、また、殺虫剤を使用しないことから環境および人間の健康にも有益な方法となる可能性が示唆された.

塗料を用いて動物を塗装する手法は、一定の距離が離れた場所から動物を認識するマーカーとして、野生動物や家畜の研究あるいは管理で用いられてきた (Hooven 1978; Silvy ら 2005). 塗装はマーカーの手法として安価かつ簡易に

動物をマーキングできる上，アニマルウェルフェアの観点からも好ましい手法とされている（Caja ら 2004）．しかしながら，動物への塗装は数週間から数か月で落ちてしまうため，短期間用のマーカ手法であると一般的に考えられている（Hooven 1978; Silvy ら 2005）．本研究では，白黒色の縞模様を塗装したが，その縞模様を長期間維持することはできないと想定されることから，畜産現場で普及をはかるためには，少なくとも吸血昆虫が発生する時期（3～4 か月）の間，白黒色の縞模様を維持する効果的な方法を今後開発する必要があると考えられる．

吸血昆虫は，吸血対象動物の臭い，形，動き，反射明度，色，反射光の偏光および体温によって誘引される（Thorsteinson 1958; Wilson ら 1966; Thompson 1969; Roberts 1977; Allan ら 1987; Hribar ら 1992; Moore ら 1996; Gibson と Torr 1999; Sasaki 2001; Mullens ら 2006; Horváth ら 2010; Blahó ら 2012; Egri ら 2012a; Egri ら 2012b; Blahó ら 2013; Horváth ら 2017）．吸血昆虫が白黒色の縞模様が付着しにくいという本研究と同様の結果は，先行研究においても報告されている（Egri ら 2012a; Waage 1981; Brady と Shereni 1988; Gibson 1992）．例えば，Waage（1981）は，円柱形のモデルを用いて，表面を白黒色の縞模様，黒色および白色の3種を比較して吸血昆虫の付着状況を調査したところ，そのモデルが動いているか，静置されているかに関わらず，白黒色の縞模様が最も付着しなかったと報告している．Brady と Shereni（1988）が実験室内で行った研究では，縞の数と密度の増加に伴って吸血昆虫の付着が減少したことを示した．Gibson（1992）は，表面が黒色あるいは白色一色よりも鉛直方向の白黒色の縞模様に吸血昆虫は付着しにくく，さらに5 cm幅の白黒色の縞模様を水平方向にすると最も吸血昆虫が付着しなかったことを示した．Egri ら（2012a）も同様の結果を報告しており，縞模様が細かい方がよりアブが付着しにくいことを示した．また，Blahó ら（2013）は，ウマ型のモデルを使用して，その表面を白黒

色の縞模様，黒色一色および白色一色とした場合のアブの付着数を比較したところ，アブを誘引する二酸化炭素およびアンモニアをモデルの周辺に放出しても白黒色の縞模様のアブが最も付着しなかったと報告している．さらに Caro ら（2019）は，生きている馬に白黒色の縞模様，黒色一色および白色一色の3種類の馬服を着せ，アブの付着数を調査したところ，白黒色の縞模様の馬服が最もアブの付着が少なかったことを示した．実際に，ウマにシマウマ様の縞模様を施してウマをアブから守ろうとしている馬飼養者もあり，また，シマウマ柄の馬服も海外では市販されている．

本研究では，供試牛に黒毛和種を用い，白黒色の縞模様を施すことによって，何も塗装せず黒い体毛で覆われている場合および黒色の縞模様を施した場合よりも牛体に付着する吸血昆虫数が有意に減少した（吸血昆虫の種については図 4.3 および表 4.1 参照）．本研究では，縞模様を施すのに水性ラッカーを用いたが，この水性ラッカーの臭いが吸血昆虫の牛体への付着に影響を及ぼす可能性が考えられる．しかしながら，付着吸血昆虫数は，塗装していない CONT 区と黒色の縞模様を施した B 区の間には有意な差は認められなかったため，水性ラッカーの臭い自体は吸血昆虫が牛体に付着する行動に影響を及ぼさなかったと推察される．したがって本研究の結果から，シマウマ様の縞模様が塗装されたものであっても馬服のように身につけたものであっても，あるいはウシであってもウマであっても同様に，表面がシマウマ様の縞模様であることによって吸血昆虫の付着が減少することが示唆された．

なぜ表面が白黒色の縞模様だと吸血昆虫が付着しにくいのだろうか？これまでに反射光の明度あるいは偏光によるものとして説明されてきている（Horváth ら 2008; Kriska ら 2009; Horváth ら 2010; Blahó ら 2012; Egri ら 2012a; Egri ら 2012b; Blahó ら 2013; Egri ら 2013; Horváth ら 2017; Horváth ら 2019）．Caro ら（2019）は，アブが誘引されて吸血対象へ飛んでいくことについて，一定距離

離れていると白黒色の縞模様が阻害する効果は認められないものの、アブが吸血対象に近づいて体表に着地しようとする段階においては、着地のために飛翔速度を減速しなければならないにも関わらず、表面が白黒色の縞模様だと減速できず着地できていないことを報告している。同様に、対象へ接近して着地する際に働く吸血昆虫の距離感制御システムに対して、白黒色の縞模様が何らかの異変を起こさせるとする説も挙げられている（How と Zanker 2014）。いずれにせよ、白黒色の縞模様に吸血昆虫が付着しにくくなる現象のメカニズムについて、今後更なる研究が必要である。

4.5 結論

吸血昆虫は畜産において深刻な経済的な損失を引き起こす害虫である。本研究では、黒毛和種繁殖雌牛にシマウマ様の縞模様を施し、その吸血昆虫忌避効果を検証した。その結果、シマウマ様の縞模様を施すことによって牛体に付着する吸血昆虫数が半減し、それに伴ってウシが行う吸血昆虫忌避行動回数が減少した。本研究の結果から、家畜の体表をシマウマ様の縞模様にすることは、慣行的に行われている殺虫剤を使用する吸血昆虫対策に代わる新たな方法となる可能性が示唆された。また、本法は殺虫剤を使用しないため、アニマルウェルフェア、人間の健康さらには環境問題のひとつである殺虫剤抵抗性問題の改善に貢献する可能性が示された。

第 5 章 黒毛和種繁殖雌牛のボディーコンディションスコア推定法の開発：3D 画像解析と機械学習によるアプローチと胸囲測定による簡易なアプローチ

5.1 緒言

家畜の摂取エネルギーの過不足あるいは肥瘦を推定するために、ボディーコンディションによる評価は有益な手法である (Edmonson ら 1989). ボディーコンディションは飼料効率 (Rathbun ら 2017) や放牧圧 (Coffey ら 2017) といった要因の影響を受け、家畜のエネルギー出納に関連している (Thorup ら 2012). 肉用牛繁殖雌牛においては、その個体が過肥または削瘦状態にあると、分娩間隔の長期化 (Osoro と Weight 1992; Uchida ら 2002)、発情周期の乱れ (Stevenson ら 2003) や受胎率の低下 (Richards ら 1986) が起き、繁殖成績が低下することが一般的に知られている。したがって、肉用牛繁殖雌牛においてボディーコンディションのモニタリングは良好な繁殖成績を維持するために必要である。

ボディーコンディションスコア (BCS) は、訓練を受けた技術者が使用するプロトコルに従って評価対象家畜のボディーコンディションを判定するものであるが、その判定は評価者の経験やプロトコルの選択に依存することが指摘されている (Kristensen ら 2006). そのため、牧場管理において、適切に BCS 判定を行うには、飼養管理者は経験を積んだ BCS 評価者を雇うか、飼養管理者自身が訓練を受けなければならない (Roche ら 2009). このような理由から、アメリカの肉用牛繁殖雌牛の生産現場では約 23% の農場でしか BCS が利用されておらず、肉用牛繁殖雌牛の飼養管理において BCS があまり活用されていないのが実情である (USDA 1998).

近年、画像関連技術は低コスト化が進み、画質や精度も向上してきたことから、飼養管理アプリケーションへの応用が期待されている (Fischer ら 2015).

特に、3Dカメラを用いて取得した3D画像からボディーコンディションに関連する特徴量を抽出し、乳牛のBCS推定に利用されてきている。例えば、Kuzuharaら（2015）や Spolianskyら（2016）は、乳牛の背面の3D画像を用いてBCSを推定する回帰モデルを作成し、良好な予測精度を得ている。さらに最近では、機械学習を用いた乳牛のBCS推定モデルも報告されてきている。機械学習で用いるデータは、そのデータ間の関係性を考慮せずに予測モデルの構築に使用でき、汎用性が高いことから様々な分野において有益なツールとして使用されてきている（McQueenら 1995; Kotsiantis 2007）。Alvarezら（2018）は畳み込みニューラルネットワーク、Songら（2019）はk近傍法、またLiuら（2020）はLeast Squares Boosting法を用いて、3D画像解析により乳牛のBCS推定モデルを作成し、それらのモデルの正解率は75%程度であったことを報告しており、3D画像解析と機械学習を用いたモデルによって、乳牛のBCS推定が可能であることが示唆される。しかし、乳牛においてはこのようなモデルが作成されているのとは対照的に、肉用牛繁殖雌牛においては同様のモデルの報告例がない。したがって、3D画像解析および機械学習を用いて作成したモデルによって肉用牛繁殖雌牛のBCS推定が可能かについて調査することは重要である。

また、肉用牛繁殖雌牛の生産現場で簡易に実施でき、かつ客観的にBCSを推定する手法が開発されることは飼養者にとって有益である。このような簡易な方法として、渡辺（1984）が乳牛のBCS推定法として紹介した、ウシの胸囲測定値と力強く締めて測定した胸囲（締胸囲）の差を用いる手法（胸囲差法）が候補として挙げられる。胸囲と締胸囲の測定値の差は牛体の脂肪蓄積を反映しているものと考えられる。本手法は、通常の胸囲と締胸囲を測定するだけであるため、特別な技術習得や訓練を必要とすることなく、飼養管理者が簡易にウシのBCSを推定することが可能である。したがって、3D画像解析と機械学習によるBCS予測手法が生産現場に普及する前においては、胸囲差法のような簡

易な手法の有用性について調査することは有益であると考えられる。

そこで本研究の目的は、3D 画像解析から抽出した肉用牛繁殖雌牛の体表 3D 情報から機械学習により新たな肉用牛繁殖雌牛の BCS 推定手法を開発すること、および簡易な BCS 推定法として、胸囲差法が肉用牛繁殖雌牛の BCS 推定に応用可能かを検証することとした。

5.2 材料および方法

本研究は、愛知県農業総合試験場動物実験等実施規定に基づいて実施した(承認番号: 30-36)。

5.2.1 3D カメラデータから抽出した 3D 特徴量を用いた BCS 推定法

5.2.1.1 BCS データの取得

供試牛は、無作為に抽出した愛知県内の 4 農場の牛舎内で飼養されている黒毛和種繁殖経産牛 39 頭とした。本研究では、公益社団法人全国和牛登録協会が定めた栄養度判定要領(全国和牛登録協会 2017)に従い、地方審査委員の資格を有する 2 名(それぞれの栄養度判定経験年数は 15 年と 3 年)で供試牛の BCS 判定を行った。本要領による BCS 判定は、ウシのき甲、背骨、肋骨、腰角、臀部および尾根部の 6 部位(図 5.1)について、各部位の脂肪蓄積状態を視診および触診により栄養度判定要領(全国和牛登録協会 2017)に記載されている説明に従って 1(非常に痩せている)から 9(非常に太っている)の 9 段階で判定した。各供試牛の BCS は 6 部位の平均(少数第 1 位を四捨五入)によって求めた。供試牛の状態(妊娠あるいは空胎および授乳あるいは乾乳)および BCS の分布を表 5.1 に示す。

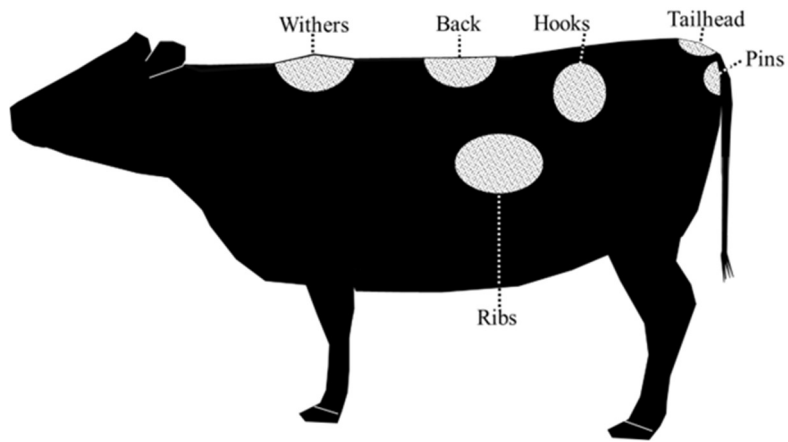


Figure 5.1 Body parts where body conditions are scored to assess the body condition score (BCS) of Japanese Black cows.

Table 5.1 Status of experimental cows (lactation and pregnancy) and the distribution of manual body condition score (BCS) obtained from the experimental cows

	Pregnant (Dry) (heads)	Non-pregnant (heads)		Manual BCS (heads)					
		Lactating	Dry	2	3	4	5	6	7
Cows used for the approach using 3D image (n = 39) ¹	12	20	7	-	-	5	24	9	1
Cows used for the approach using heart girth measurements (n = 118) ²	52	24	42	2	11	16	47	31	11

¹ Data explained in section “5.2.1.1. BCS estimation using 3D features extracted from 3D camera data”.

² Data explained in section “5.2.2.1. BCS estimation using the difference between heart girth (HG) and tightened heart girth (THG)”

5.2.1.2 3D カメラを用いた 3D 画像の取得

本研究では、供試牛の尻部の 3D 画像を 3D カメラ（Hapimo:3D; 株式会社ノア, 茨城）を用いて取得した。用いた 3D カメラの距離センサは Light Coding 方式で、深度画像サイズは 640 × 480 ピクセル、水平方向および垂直方向の視野角はそれぞれ 58°と 45°であった。供試牛の尻部の 3D 画像は、後述する 3D 画像の加工を行う際の目印とするため、供試牛の腰角、寛骨および坐骨端にテープを貼り、1 m 以内から 3D カメラで撮影することにより取得した。

5.2.1.3 3D 画像の加工

取得した 3D 画像の加工には、フリーソフトウェアの CloudCompare (ver. 2.11.3, GPL software, 2020, <http://www.cloudcompare.org/>) を用いた。慣行の視診と触診による BCS 判定では、牛体の 6 部位（き甲，背骨，肋骨，腰角，坐骨および尾根部）の脂肪蓄積状態から判定するが、3D 画像処理では腰角，寛骨および坐骨端の 3 部位を目印として供試牛の尻部を切り出し，3D 特徴量を抽出した。3D 特徴量の抽出には，供試牛 1 頭につき 1 枚の 3D 画像を用いた。BCS 推定に用いる 3D 特徴量を抽出するため，各供試牛の 3D 画像について，3D 画像上で腰角，寛骨および坐骨端の 3 点を頂点とする尻部の 3D 表面を選択し（図 5.2a），セグメントツールにより切り取った（図 5.2b）。また，腰角，寛骨および坐骨端の 3 点を通る点群平面を作成した（図 5.2c）。尻部の 3D 表面および作成した点群平面を用いて，尻部の 3D 表面積，体積，点群平面へ尻部の 3D 表面を投影した写像の面積および尻部の 3D 表面と点群平面の間の平均距離を算出した。尻部の 3D 表面積は“Measure surface tool”を用いて算出した。尻部の 3D 表面の体積は，尻部の 3D 表面を Ceiling，点群平面を Ground としてそれらの間の空間を尻部の 3D 表面の体積とし，“2.5D Volume tool”を用いて算出した。“2.5D Volume tool”を用いた尻部の 3D 表面の体積の算出では，体積とともに

尻部の 3D 表面の点群平面への写像面積も算出されるため、それを写像面積とした（図 5.2d）。尻部の 3D 表面と点群平面の間の平均距離は、“Cloud-to-Cloud Distance tool”を用いて算出した（図 5.2e）。

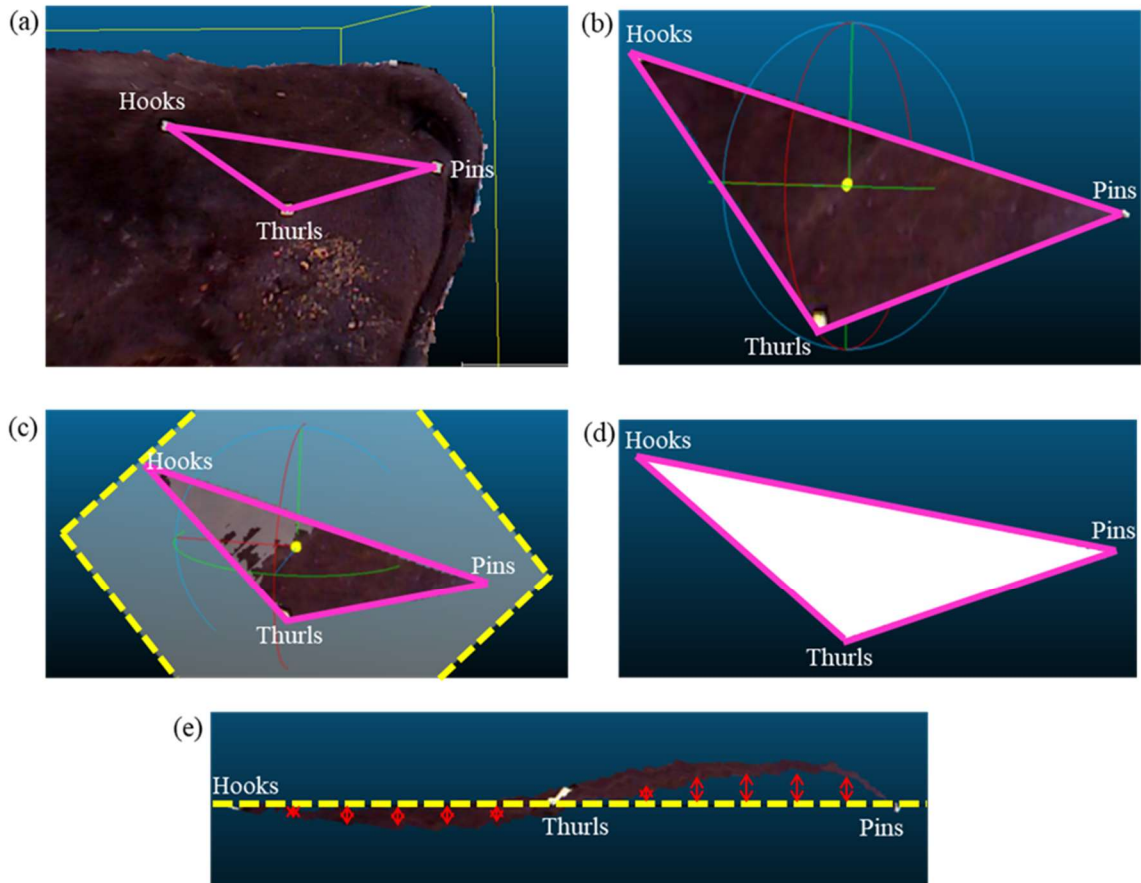


Figure 5.2 (a) Examples of three-dimensional (3D) image processing to extract 3D body features; that is, the localizations of three landmarks (hooks, thurls, and pins); (b) 3D surface of the rump region used to calculate its area; (c) 3D surface of the rump region and a plane passing through the three landmarks, wherein the yellow dotted square line shows the sides of the plane; (d) a base surface showing that the 3D surface of the rump area is projected on the plane; and (e) image diagram showing the distance between the 3D surface of the rump region and the plane, wherein the yellow dotted line shows the plane.

5.2.1.4 機械学習

本研究では、上述の4種の3D特徴量によるBCSの推定を機械学習により行った。機械学習には、フリーソフトウェアWEKA 3.8.1 (Frankら 2016)のパッケージのAuto-WEKA (Thorntonら 2013; Kotthoffら 2016)を用いた。Auto-WEKA (Thorntonら 2013; Kotthoffら 2016)は、WEKAに実装されている分類および回帰アルゴリズムのうち39種について、ベイジアン最適化法を用いてハイパーパラメータのチューニングと最適アルゴリズムの選択を自動で行い、また、モデルの汎化性能の評価に10ホールド交差検証を内蔵したツールである (Kotthoffら 2016)。

5.2.1.5 選択された分類モデルの性能評価

Auto-WEKA (Thorntonら 2013; Kotthoffら 2016)により最終的に選択されたモデルの性能評価は、モデルによって分類された各BCSクラスについて次の指標を用いて行った。

$$\text{Overall accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$\text{F-measure} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Sensitivity}}{\text{Precision} + \text{Sensitivity}} \quad (4)$$

ここで、TPは真陽性、TNは真陰性、FPは偽陽性およびFNは偽陰性である。Overall accuracy (正解率)は正しく予測した例数 (TPとTNの和)のサンプル全体に対する割合である。Precision (適合率)はTPのTPとFPの和に対する割合のことで、同条件下での繰り返しの測定でどれほど同じ結果を示すかの指標であり、Sensitivity (感度)はTPのTPとFNの和に対する割合のことで、どれほど予測モデルが偽陰性を避けることができるかを示す指標である (PattersonとGibson 2017)。F-measureは、適合率と感度の調和平均であり、こ

の値が上限値の 1 であると適合率と感度の値が最高値となる．逆に適合率と感度の値が悪ければ F-measure 値は 0 となる．F-measure は，機械学習で得られたモデルの精度を示す代表的な指標として用いられている（Patterson と Gibson 2017）．

5.2.2.1 胸囲差を用いた BCS 推定

胸囲差を用いた BCS 推定の調査には，愛知県内の 5 農場を無作為に抽出し，それらの農場の牛舎内で飼養されている 118 頭の黒毛和種経産雌牛を供試牛として用いた．各供試牛の BCS は 5.2.1.1 と同様に判定した．供試牛の状態（妊娠あるいは空胎および授乳あるいは乾乳）および BCS の分布を表 5.1 に示す．各供試牛の胸囲は，体尺測定用のプラスチック製メジャーを用いて測定し，測定位置は肩甲骨後端から指二本分牛体後方部とした．締胸囲は胸囲と同じ位置で測定し，その際，締める力を強くしていき，供試牛がメジャーで締められるのに対して嫌がる行動を示さず，かつ締胸囲の測定値が変化しない値を締胸囲の測定値とした．胸囲と締胸囲の測定値は，本手法の生産現場での普及性を考慮し，飼養者が簡易に利用できるようにするため 1 cm 単位とした．各供試牛の胸囲差値は，測定した胸囲と締胸囲の差から算出した．

5.2.2.2. 統計解析

胸囲差を用いた BCS 推定モデルの作成に累積ロジスティック回帰分析を用いた．技術者が判定した BCS を従属変数，胸囲差を説明変数とし，SAS（SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA）の HPLOGISTIC プロシジャにより累積ロジスティック回帰分析を行った．

5.3 結果および考察

5.3.1 3D 特徴量と機械学習アルゴリズムを用いた BCS 推定モデル

技術者によって判定された BCS と 4 種の各 3D 特徴量との関係を図 5.3 に示す。BCS が 7 のクラスを除いて、3D 表面の体積と 3D 表面と点群平面の間の平均距離が増加すると BCS も高くなる傾向にあった一方、3D 表面積と写像面積が増加すると BCS が低くなる傾向にあった。

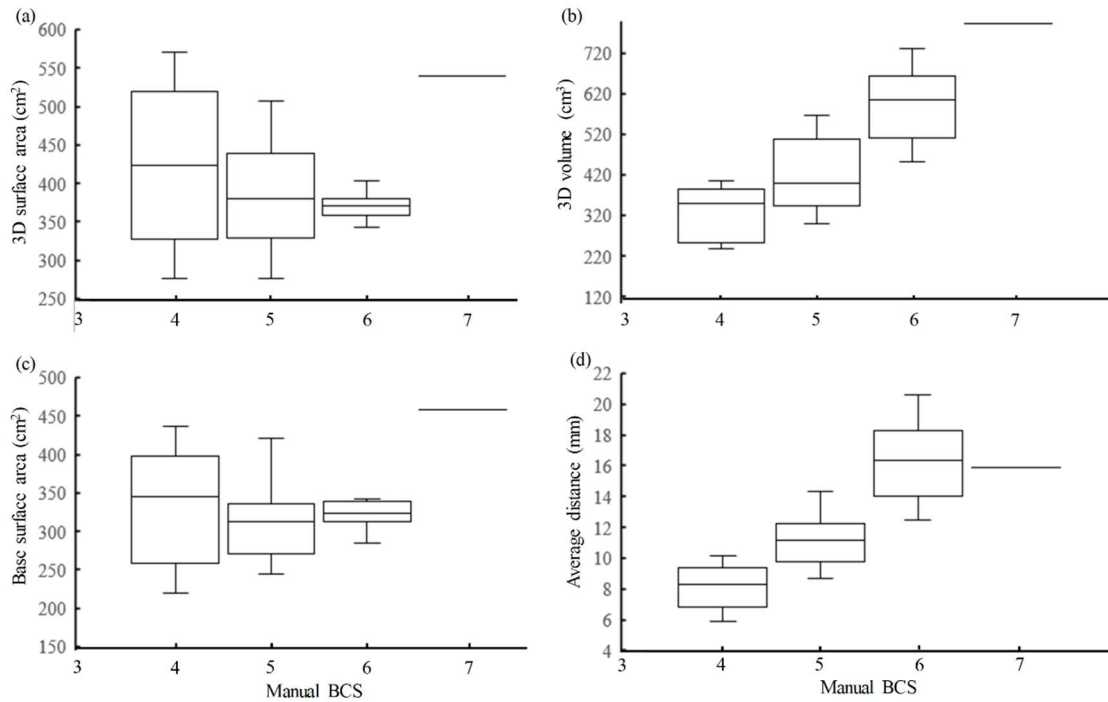


Figure 5.3 Relationships between manual body condition score (BCS) classes and 3D surface areas of the rump area [3D surface area] (a), volumes of the space between the 3D surface of the rump area as the ceiling and plane passing through the landmarks as the ground [3D volume] (b), base surface areas projected on the plane passing through the landmarks [base surface] (c), and average distances between the 3D surface of the rump area and the plane [average distance] (d). Box plots indicate median lines and 25th and 75th percentiles.

WEKA には 39 種のアプローチが実装されているが、それらのうち、4 種の 3D 特徴量から BCS を予測する最適モデルとして Auto-WEKA により選択されたアプローチは AdaBoost.M1 であった。AdaBoost.M1 でのモデルの分類結果（混合行列）およびモデルの性能評価の指標を表 5.2 に示す。10 ホールド交差検証を経て得られた本モデルの正解率は 90% であり、各 BCS の分類結果の適合率、感度および F-measure の加重平均はそれぞれ 88%、90% および 88% であった。Alvarez ら (2018) は、3D 特徴量から乳牛の BCS (BCS の誤差 0.25 以内) を畳み込みニューラルネットワークを用いて分類を行い、その結果、正解率と適合率、感度および F-measure の加重平均はそれぞれ 78%、77%、78% および 77% であったと報告している。同様に Song ら (2019) が 3D 特徴量を用いて乳牛の BCS を k 近傍法により分類を行った研究では、正解率と適合率、感度および F-measure の加重平均はそれぞれ 72%、73%、72% および 72% であった。さらに、Liu ら (2020) が行った同様の研究では、Least squares boosting 法を用いて乳牛の BCS を分類した際の正解率は 76% であった。本研究における正解率、適合率、感度および F-measure の値は、これらの先行研究での報告値よりも高かった。この要因としては、Auto-WEKA (Thornton ら 2013; Kotthoff ら 2016) によってハイパーパラメータ値が最適化されたモデルの中で AdaBoost.M1 が選択されたこと、また本研究で用いたデータセットのデータ数が先行研究よりも少なく、かつ BCS の分布に偏りがあったことが考えられる。本研究で使用したデータセットでは、BCS の分布において、BCS が 5 のデータ数が多い一方で BCS が 7 のデータ数が少なかった (表 5.1)。クラス間のデータ数が不均衡であるデータセットを用いて機械学習を行う際には、通常データ数が多いクラスに過学習し、データ数が少ないクラスへ正しく分類されにくくなると言われている (López ら 2013)。そのため、不均衡データを用いる際には、これまで 2 通りのアプローチが報告されている。一方はデータ段階でデータのリサンプリン

グによるアプローチであり，他方はアルゴリズムの段階でアンサンブルおよびコスト考慮型のアルゴリズムの選択によるアプローチである（Haixiang ら 2017）．前者のアプローチでは，機械学習を用いた畜産分野の研究において，各クラスのデータ数が偏らないように供試動物を選択した研究（Song ら 2019）やデータ数が少ないクラスに合わせてデータ数が多いクラスのデータをランダムでリサンプリングして各クラスのデータ数を均一化させた研究（Sakai ら 2019）が報告されている．したがって，本研究の BCS 予測モデルの信頼度を向上させるためには，今後，供試頭数自体を増加させることおよび供試動物を選択することによりクラス間のデータ数の不均衡を是正することが必要であると考えられる．また，後者のアプローチとしては，AdaBoost（アンサンブルアルゴリズムの 1 つ）は，不均衡データを取り扱うアンサンブルアルゴリズムとして最も一般的なアルゴリズムであり（Li ら 2019），新たなアンサンブルアルゴリズムの開発の基礎として最も使用されているアルゴリズムである（Haixiang ら 2017）．本研究における正解率，適合率，感度および F-measure の値は先行研究と比較して高かったが，これは Auto-WEKA（Thornton ら 2013; Kotthoff ら 2016）によって最適なアルゴリズムとして AdaBoost.M1 が選択されたことが要因のひとつと考えられた．それと同時に Auto-WEKA（Thornton ら 2013; Kotthoff ら 2016）によって最適なハイパーパラメータ値が選択されたことも影響していると考えられる．Luo（2016）によると，アルゴリズムとハイパーパラメータ値の選択は，得られるモデルの精度に大きな影響を及ぼす．Thornton ら（2013）は，21 のデータセットについて，WEKA で実装されている 39 種のアルゴリズムを用いてモデルの正解率の平均変化率を調べたところ，46% がアルゴリズムの選択とハイパーパラメータの設定によって引き起こされたと報告している．そのため，機械学習を行う際には，アルゴリズムの選択とハイパーパラメータ値の設定を適切にすることが非常に重要である．本研究では，3D 特徴量から黒

毛和種繁殖雌牛の BCS を予測するモデルを作成したが，その際 Auto-WEKA (Thornton ら 2013; Kotthoff ら 2016) により，ハイパーパラメータ値の設定および最適なアルゴリズムの選択が行われていた．このことが本研究のモデルの性能評価指標値が先行研究と比べて高かったこと影響したと推察された．

Table 5.2 Confusion matrix with the number of samples classified according to the body condition score (BCS) classes of Japanese Black cows, and the overall accuracy, precision, sensitivity, and F-measure by a selected machine learning algorithm¹ with all four three-dimensional (3D) body features (i.e., 3D surface area, 3D volume, base surface area projected on a plane passing through the three landmarks, and average distance between 3D surface of rump area and the plane).²

	Confusion matrix					Evaluation metrics				
	Model-classified					Overall accuracy (%)	Precision (%)	Sensitivity (%)	F-measure (%)	
	BCS				Total					
	4	5	6	7						
Manual	4	4	1	0	0	5	90	100	80	89
BCS	5	0	24	0	0	24		89	100	94
class	6	0	2	7	0	9		88	78	82
	7	0	0	1	0	1		0	0	0
								88 ³	90 ³	88 ³

¹ Via selection of an algorithm with hyperparameter optimization by Auto-WEKA, the AdaBoost.M1 algorithm was selected as the best model.

² Also see Figure 5.2

³ Averages weighted with the number of examples in the respective manual BCS class

これまで 3D 特徴量を用いた BCS 予測モデルの作成を行った先行研究のほとんどが乳牛を対象としている (Salau ら 2017; Hansen ら 2018; Alvarez ら 2018; Song ら 2019; Martins ら 2020). 現在では 3D 画像解析を基にした乳牛の BCS 推定システムが存在しており (Silva ら 2021), そのうちのいくつかは BCS 予測精度の検証が行われている (e.g., DeLaval BCS (Mullins ら 2019); BodyMat F systems (O’Leary ら 2020)). しかしながら, 3D 画像データから抽出した 3D 特徴量を用いて, 肉用牛繁殖雌牛の BCS 推定モデルを報告した例はこれまでに見当たらない. 本研究の結果は, 先行研究で報告された乳牛の BCS 推定モデルの性能と遜色なかったことから, 3D 特徴量と機械学習によって肉用牛繁殖雌牛の BCS 推定が可能であることが示唆された. そのため, 近い将来, 3D 画像解析から 3D 特徴量の抽出および肉用牛繁殖雌牛の BCS を自動で推定するシステムの開発が必要となると考えられる.

5.3.2 先行研究との BCS 推定性能の比較

本研究では BCS 推定モデルの作成において, BCS をカテゴリカルデータとして扱ったが, 先行研究の多くでは BCS を連続変量として扱い, 一般的な線形回帰分析を行っている. したがって, 先行研究の結果と BCS 分類性能について比較を行うため, 本研究では順序変数として扱った BCS を連続変量と見なして従属変数とし, 4 種の 3D 特徴量を説明変数として, ステップワイズ法 (説明変数の選択基準は $P < 0.15$) による重回帰分析を行った. 得られた回帰式は, $BCS = 0.169 \times DIS + 3.123$ ($R^2 = 0.63$) であった (DIS は, 尻部の 3D 表面と, 腰角, 寛骨および坐骨端を通る点群平面との間の平均距離). なお本重回帰分析において, その他 3 種の 3D 特徴量は説明変数として選択されなかった. Bercovich ら (2013) は 2D 画像を用いて BCS を予測する回帰式を作成し, その R^2 は 0.77 であったと報告している. また, 3D 画像を用いて BCS 推定式を作成した

Kuzuhara ら（2015）および Spoliansky ら（2016）の R^2 はそれぞれ 0.74 および 0.75 であった。Martins ら（2020）は、牛体の背面部と側面部の 3D 画像のそれぞれを用いて BCS 推定式を作成しており、その R^2 はそれぞれ 0.61 および 0.63 であったと報告している。さらに先行研究では、得られた回帰式の精度評価にモデルの予測値と実測値間の平均絶対誤差（MAE）も用いている。Spoliansky ら（2016）、Hansen ら（2018）および Song ら（2019）の MAE はそれぞれ 0.26、0.21 および 0.15 と報告されており、本研究の 0.30 よりもわずかに低かった。

Song ら（2019）は、BCS は評価を受けたウシを各ボディーコンディションのクラスに分類するものであるため、BCS を順序変数とすべきであると指摘している。そこで、順序変数として扱った BCS を従属変数とし、4 種の 3D 特徴量を説明変数として、ステップワイズ法（説明変数の選択基準は $P < 0.05$ ）を用いた累積ロジスティック回帰分析を行った。その結果、上述の回帰分析と同様に DIS のみが説明変数として選択され、算出された Nagelkerke R^2 (Nagelkerke 1991) は 0.73 であった。以上から、本研究で用いた 4 種の 3D 特徴量を用いた BCS の推定性能は先行研究と同等と推察された。

5.3.3 胸囲差を用いた BCS 推定法

実測の BCS と胸囲差の関係を図 5.4 に示す。実測の慣行 BCS を従属変数、胸囲差を説明変数とした累積ロジスティック回帰分析によって得られた Nagelkerke R^2 は 0.81 であった。栄養度判定要領（全国和牛登録協会 2017）では、ボディーコンディションが普通と判定されるのは BCS が 4（やせ気味）から 6（太り気味）と定められている。本研究では、胸囲差が 4 から 6 cm であった 73 頭のうち 70 頭において実測の BCS が 4 から 6 と判定されていた。また、累積ロジスティック回帰分析の結果から、胸囲差が 4 から 6 cm であった場合に、BCS が普通（BCS が 4 から 6）と判定される確率を算出したところ、その

値は 97.1% であり、非常に高い値であった。これらの結果から、簡易な方法である胸囲差を用いた BCS 推定法は肉用牛繁殖雌牛に応用可能であることが示され、これにより、BCS 判定の経験が無い、あるいは浅い飼養者であっても所有する肉用牛繁殖雌牛の BCS を推定することが可能であると考えられた。

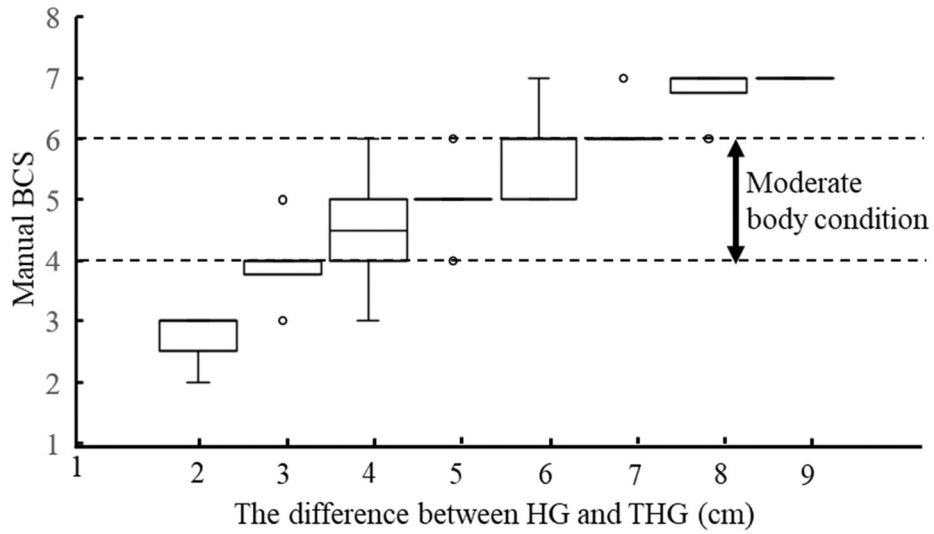


Figure 5.4 Relationship between manual body condition score (BCS) classes and the differences between heart girth (HG) and tightened heart girth (THG) for Japanese Black cows. Box plots indicate the median lines and the 25th and 75th percentiles. Outliers in the manual BCS values are plotted individually as “○.”

5.3.4 今後の課題

本研究では、肉用牛繁殖雌牛の尻部の 3D 表面から抽出した 3D 特徴量を用いて、機械学習により BCS を推定するモデルを作成した。高橋ら（2016）は、雌牛の生産形質と尻部の 3D 表面に関係性があることを示唆しているが、肉用牛繁殖雌牛の BCS 判定法の多くでは、牛体の後軀だけでなく、き甲部や胸垂部を含めた前軀も評価して BCS を判定している（Richards ら 1986）。また、Song ら（2019）は BCS 推定の感度を向上させるため、ボディーコンディションに関連のある部位の特徴量を尻部以外からも抽出し、追加する必要があると指摘している。そのため、将来的には尻部に加えて他の体部から抽出した 3D 特徴量を追加することによる BCS 推定精度の向上について検討する必要があると考えられる。さらに、3D 画像解析による BCS 推定手法を肉用牛繁殖雌牛の生産現場へ実用化するため、本手法の自動システム化に今後取り組む必要があると考えられる。

本研究で用いたデータは、BCS クラス間のデータ数が不均衡であった（表 5.1）。本データセットでは、BCS が 5 のクラスのデータ数が多く、極端な BCS（極度の痩身や過肥）のクラスのデータ数が少なかった。本研究で用いたデータセットのように、適切な飼養管理が実施され BCS が普通と判定されたウシが多く、BCS の分布が不均衡であったデータセットを用いている先行研究も見受けられるが（Spoliansky ら 2016; Alvarez ら 2018; Hansen ら 2018; Liu ら 2020）、BCS 推定モデルの信頼度を向上するため、BCS の分布を均一化したデータセットを用いる必要があると考えられた。

5.4 結論

本研究では、肉用牛繁殖雌牛の尻部の 3D 表面から抽出した 3D 特徴量と機械学習を用いて BCS 推定モデルを作成した。最適な機械学習アルゴリズムとして

AdaBoost.M1 が選択され、本モデルの正解率、適合率、感度および F-measure はそれぞれ 90%、88%、90% および 88% であった。これらの結果から、3D 画像から抽出した 3D 特徴量と機械学習を用いて肉用牛繁殖雌牛の BCS 推定を行うことは可能であることが示唆された。また本研究では、肉用牛繁殖雌牛の BCS 推定手法として胸囲差を用いる方法についても確立し、累積ロジスティック回帰分析で得られたモデルの Nagelkerke R^2 は 0.81 であった。この胸囲差を用いる方法は、通常胸囲と締胸囲を測定するのみであり、特別な訓練や技術を必要としないため、飼養者が簡易に肉用牛繁殖雌牛の BCS を推定することが可能となると考えられた。

第 6 章 総括

わが国では、飼料自給率の向上や資源循環型畜産の推進といった社会的背景から和牛放牧が推奨されている（農林水産省 2020）。放牧は、舎飼いと比べて低コスト化や省力化といった経営的なメリットがある（千田 2016）一方、ある意味ウシの自主性に任せた飼養管理方法であるため（渡辺ら 2020）、舎飼いと異なるリスクが存在する（千田 2012）。また、和牛放牧で用いられる放牧地は、水田や耕作放棄地あるいは山林地と多岐にわたり、地形条件といった環境条件が異なるため、それぞれの環境条件によって放牧に伴うリスクの顕在化要因が異なってくる。さらに、放牧地の周りに田畑があるのか、他の畜産経営体があるのか、あるいは人家があるのかといった周辺状況によって、必要なリスクマネジメントの方向性が異なってくると考えられる。したがって、和牛放牧を行う際には、各放牧地の環境条件に合わせた放牧管理が必須となる。

そこで本研究では、栄養不良、有害草の採食による中毒症および脱柵の発生に関係する放牧牛のエネルギー消費量と環境問題に関係する放牧牛の放牧地内での空間的利用パターンに着目し、それらの推定を行った。また、吸血昆虫が媒介する放牧牛の疾病感染に関係する吸血昆虫対策に着目し、新たな吸血昆虫対策技術の開発を行った。さらに、放牧牛の栄養状態および健康状態を確認し、それまで行っていた放牧管理の評価・改善につなげるために黒毛和種繁殖雌牛の BCS 推定法を開発した。

第 2 章では、これまでに報告された複数の文献値を用いて、下り歩行も含めたエネルギー消費量（EE）比推定式を作成した。本推定式は、6 種の有蹄動物の文献値から構成されていたのにも関わらず、決定係数 R^2 は 0.85 と高い値であり、これは EE 比の算出により体重の影響を実質的に相殺できたことによると考えられた。また、本推定式は水平佇立時の EE が既知であれば、有蹄動物

において種を超えて EE の推定が可能であると推察された。さらに、本推定式を用いて、実際の放牧牛の EE を推定したところ、放牧牛の EE は約 900~950 kJ/kg^{0.75}・日と推定された。本試験地のように地形条件が厳しい放牧地では、舎飼い時の 2 倍程度のエネルギーを消費していることが示唆された。

第 3 章では、放牧牛の行動圏を解析し、空間的利用パターンと EE との関係を調査した。各利用強度域の面積は夜間に比べて昼間の方が広く、平均斜度は夜間に比べて昼間の方が緩やかであったことから、放牧牛は昼間に平地あるいは緩傾斜地に広く分布し、夜間は傾斜地に留まるという空間的利用パターンを示すことが示唆された。また、空間的利用パターンの季節変化については、季節を通じて各利用強度域の面積に変化は見られなかったが、高および中利用強度域の平均斜度は季節を経るにつれて急となり、初夏においては、各利用強度域の平均斜度と EE との間に正の相関関係が認められた。初秋においては、高および中利用強度域の面積と EE との間は負の相関関係にあったが、晩秋においては正の相関関係が認められた。これらの結果から放牧牛は、初夏においては、放牧地内の平地あるいは緩傾斜地を主に利用し、そこから急傾斜となる山地の方へ利用領域を広げるといった空間的利用パターンを示し、季節を経て初秋および晩秋になると、放牧牛は主に急傾斜地を利用し、そこから緩傾斜地や平地へ下って利用領域を広げるといった初夏とは逆の空間的利用パターンを示したと推察された。

第 4 章では、新たな吸血昆虫対策技術として、黒毛和種繁殖雌牛にシマウマ様の白黒色の縞模様を施し、その吸血昆虫忌避効果を検証した。シマウマ様の縞模様を施すと、縞模様を施していない場合に比べて、牛体に付着した吸血昆虫数が半減し、また、ウシが吸血昆虫を忌避する行動が約 20% 減少した。本試験では、縞模様を施すのに白色の水性ラッカーを用いたが、この水性ラッカーの臭いが吸血昆虫の牛体への付着に影響を及ぼす可能性が考えられた。しかし

ながら，付着吸血昆虫数および忌避行動回数ともに縞模様を施していない区と黒色の水性ラッカーで黒色の縞模様を施した区の間には有意な差は認められなかったことから，吸血昆虫が牛体に付着する行動に水性ラッカー自体の影響はなかったと推察された．したがって，黒毛和種繁殖雌牛の体表をシマウマ様の縞模様にするにより，牛体に付着する吸血昆虫数および吸血昆虫忌避行動を低減できる新たな吸血昆虫対策技術となる可能性が示された．一方，本研究で行った水性ラッカーによる縞模様の塗装は，長くても1週間程度で落ちてしまい，吸血昆虫の発生数が増加する6月頃から10月頃まで縞模様を維持できない点に課題が残る．本技術の普及のためには，この吸血昆虫が発生している期間，縞模様を維持するのが最も好ましいと考えられる．ただし，放牧中は放牧牛に殺ダニ剤を2週間間隔で塗布することが推奨されている（農業・食品産業技術総合研究機構畜産研究部門 2017）ため，殺ダニ剤の塗布に合わせて縞模様を施すことも可能である．その場合には，少なくとも2週間，縞模様を維持することのできる手法の開発が必要である．

第5章では，黒毛和種繁殖雌牛の客観的なBCS推定法として，3D画像データと機械学習による推定法と胸囲測定による推定法の2手法を開発した．黒毛和種繁殖雌牛の尻部の3D画像解析から抽出した3D特徴量と機械学習により黒毛和種繁殖雌牛のBCS推定モデルを作成した．最適な機械学習アルゴリズムとしてAdaBoost.M1が選択され，本モデルの正解率，適合率，感度およびF-measureはそれぞれ90%，88%，90%および88%であった．したがって，3D画像から抽出した3D特徴量から機械学習を用いて黒毛和種繁殖雌牛のBCS推定が可能であることが示唆された．しかしながら，本研究で使用したデータ数は39と少なく，また，各BCSクラス間のデータ数が不均衡であったため，BCS推定モデルの信頼度向上には，今後データ数の増加および各BCSクラス間のデータ数の均一化が必要であると考えられた．さらに，3D画像解析によるBCS推

定手法を黒毛和種繁殖雌牛の生産現場へ実用化するため、本手法の自動システム化に今後取り組む必要がある。また、通常の胸囲と締胸囲から得られる胸囲差を用いた BCS 推定手法では、回帰分析で得られたモデルの Nagelkerke R^2 は 0.81 と高い値であった。本法は、通常の胸囲と締胸囲を測定するのみであり、特別な訓練や技術を必要としないため、飼養者が放牧されている和牛繁殖雌牛の BCS を簡易に推定することが可能となった。これらの研究成果から、栄養不良、中毒症、脱柵、環境問題および疾病感染といった放牧に伴うリスクの低減をはかることができ、また、放牧中に実施しているリスク低減策を含む放牧管理を評価し、改善に繋げることが可能となった。

近年、舎飼いでは、ウシに 3 軸加速度センサといった生体センサを装着し、その測定データがインターネット上のクラウドサーバで解析され、センサを装着したウシの活動量や行動割合を飼養者が PC やスマートフォンから確認でき、また、活動量の増減から発情や体調不良の可能性を飼養管理者に通知するシステム (e.g., U-motion; デザミス (株), 東京; Farmnote Color; (株) ファームノート, 北海道) が日本国内で市販され生産現場に普及してきている。また、放牧においても放牧牛に GPS や生体センサを装着し、上述と同様のシステム開発の研究が行われており (喜田ら 2020)、遠隔地から放牧を監視するシステムも市販され始めている (e.g., うしみる; (株) GISupply, 北海道)。このような放牧監視システムでは、飼養者は PC やスマートフォンにより放牧牛のリアルタイムの位置情報が確認できるようになっているが、第 2 章および第 3 章で示した放牧牛の EE や行動圏の情報は提供されていない。本システムでは、GPS を用いて放牧牛の位置情報を取得していることから、放牧牛の EE や行動圏の情報についても飼養者へ提供することが可能と考えられる。また、放牧牛に補助飼料を給与する場所にカメラを設置することで、第 4 章で示した放牧牛に施した縞模様の状態を確認することができ、殺ダニ剤の塗布とともに縞模様を再度

施す必要性について判断することが可能となる。さらに、設置するカメラを 3D カメラとすることで、第 5 章で示した手法により、放牧牛の BCS を日々確認することが可能となる。近い将来、これらを組み込んだシステムが構築されることにより、飼養者は、放牧牛の日々の EE、行動圏、縞模様の状態および BCS を容易に確認でき、補助飼料給与量の調整、放牧地内の利用強度が高い箇所への対策、継続的な吸血昆虫忌避対策および精密な栄養管理と健康状態の確認が可能になると期待される。

以上から、本研究で示した EE 比推定式の作成およびそれを用いた放牧牛の EE の推定、放牧牛の放牧地内での空間的利用パターンの把握、牛体の表面をシマウマ様の縞模様を施すという新たな吸血昆虫対策技術の開発および放牧牛の BCS を客観的に推定する手法の開発は、環境条件に合わせた適切な和牛放牧管理に貢献するものと考えられた。

謝辞

本論文の執筆に際して、終始懇切な御指導と御助言を賜りました京都大学大学院農学研究科応用生物科学専攻畜産資源学分野 廣岡博之教授，大石風人助教に深甚なる感謝の意を表します。また，本研究について大変有益な御助言をいただくとともに励ましてくださった京都大学大学院農学研究科応用生物科学専攻畜産資源学分野 熊谷元准教授に心から感謝申し上げます。

本論文を執筆する機会を与えてくださった愛知県農業総合試験場畜産研究部増田達明部長をはじめ，同部養牛研究室 森下忠室長，同室 佐藤精主任研究員，元同室 松原靖氏，青木直人氏には終始適切な御援助と温かい励ましをいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり，元京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻守屋和幸教授には御指導いただくとともに，適切な御助言と温かい励ましをいただきました。また，元愛知県農業総合試験場畜産研究部長 上田淳一氏，木野勝敏氏，栗田隆之氏に適切な御援助と熱い励ましをいただきました。元京都府農林水産技術センター畜産センター碓高原牧場吉岡正行氏，太田典宏氏，京都府林業試験場の職員の方々，愛知県畜産総合センター三河高原牧場の職員の方々，愛知県の和牛農家の方々には多大なる調査への御助力をいただきました。ここに厚く感謝の意を表します。

愛知県農業総合試験場畜産研究部養牛研究室の諸氏には多大な御尽力をいただきました。元同室 秋山裕一氏，松永竜一氏，永田茂寛氏，深津有史氏，同室 渡會秀和氏，稲垣良弘氏，臼井崇氏，小野伊佐郎氏，馬野大知氏にはデータ採取に関して多大な御協力をいただきました。ここに心から御礼を申し上げます。

また，京都大学農学研究科応用生物科学専攻畜産資源学分野での本研究の遂

行および研究室生活で温かい御支援と御協力をいただきました元同分野 上原美雪氏，同分野の先輩方と同期，後輩の皆さまに心から感謝申し上げます。

最後に，学生生活を支えてくれた両親，常に励まし支えてくれた妻と娘たちに心から感謝いたします。家族の励ましがあったからこそ，本研究を全うすることができました。心より御礼申し上げます。

引用文献

- Aharoni Y, Henkin Z, Ezra A, Dolev A, Shabtay A, Orlov A, Yehuda Y, Brosh A. 2009. Grazing behavior and energy costs of activity: A comparison between two types of cattle. *Journal of Animal Science* **87**, 2719-2731.
- Allan SA, Day JF, Edman JD. 1987. Visual ecology of biting flies. *Annual Review of Entomology* **32**, 297-316.
- Alvarez JR, Arroqui M, Mangudo P, Toloza J, Jatip D, Rodríguez JM, Teyseyre A, Sanz C, Zunino A, Mateos C. 2018. Body condition estimation on cows from depth images using Convolutional Neural Networks. *Computers and Electronics in Agriculture* **155**, 12-22.
- Anderson DJ. 1982. The home range: a new nonparametric estimation technique. *Ecology* **63**, 103-112.
- 安藤哲, 的場和弘. 2006. 育成牛における歩行運動時の熱産生量の増加ならびに心拍数と熱産生量の関係. 日本畜産学会報 **77**, 45-49.
- Bailey DW, Gross JE, Laca EA, Rittenouse LR, Coughenour MB, Swift DM, Sims PL. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management* **49**, 386-400.
- Bercovich A, Edan Y, Alchanatis V, Moallem U, Parmet Y, Honig H, Maltz A, Antler I, Halachmi I. 2013. Development of an automatic cow body condition scoring using body shape signature and Fourier descriptors. *Journal of Dairy Science* **96**, 8047-8059.
- Blahó M, Kriska G, Hegedüs R, Åkesson S, Horváth G. 2012. Spottier targets are less attractive to tabanid flies: on the tabanid-repellency of spotty fur patterns. *PLoS ONE* **7**, e41138.

- Blahó M, Egri Á, Száz D, Kriska G, Åkesson S, Horváth G. 2013. Stripes disrupt odour attractiveness to biting horseflies: Battle between ammonia, CO₂, and colour pattern for dominance in the sensory systems of host-seeking tabanids. *Physiology & Behavior* **119**, 168-174.
- Boyne AW, Brockway JM, Ingram JF, Williams K. 1981. Modification, by tractive loading, of the energy cost of walking in sheep, cattle and man. *Journal of Physiology* **315**, 303-316.
- Brady J, Shereni W. 1988. Landing responses of the tsetse fly *Glossina morsitans morsitans* Westwood and the stable fly *Stomoxys calcitrans* (L.) (Diptera: Glossinidae & Muscidae) to black-and-white patterns: a laboratory study. *Bulletin of Entomological Research* **78**, 301-311.
- Brockway JM, Boyne AW. 1980. The energy cost for sheep of walking on gradients. In Mount LE (ed.), *Energy Metabolism of Farm Animals*, pp. 449-453. European Association for Animal Production Publication no. 26, Butterworths, London.
- Brosh A, Henkin Z, Ungar ED, Dolev A, Orlov A, Yehuda Y, Aharoni Y. 2006a. Energy cost of cows' grazing activity: Use of the heart rate method and the Global Positioning System for direct field estimation. *Journal of Animal Science* **84**, 1951-1967.
- Brosh A, Henkin Z, Orlov A, Aharoni Y. 2006b. Diet composition and energy balance of cows grazing on Mediterranean woodland. *Livestock Science* **102**, 11-22.
- Burt WH. 1943. Territoriality and home range concepts as applied to mammals. *Journal of Mammalogy* **24**, 346-352.
- Buxton BA, Hinkle NC, Schultz RD. 1985. Role of insects in the transmission of bovine leukosis virus: potential for transmission by stable flies, horn flies, and tabanids. *American Journal of Veterinary Research* **46**, 123-126.

- Byford RL, Craig ME, Crosby BL. 1992. A review of ectoparasites and their effect on cattle production. *Journal of Animal Science* **70**, 597-602.
- Caja G, Ghirardi JJ, Hernández-Jover M, Garín D. 2004. Diversity of animal identification techniques: from 'fire age' to 'electronic age'. *ICAR Technical Series* **9**, 21-39.
- Campbell JB, Skoda SR, Berkebile DR, Boxler DJ, Thomas GD, Adams DC, Davis R. 2001. Effects of stable flies (*Diptera: Muscidae*) on weight gains of grazing yearling cattle. *Journal of Economic Entomology* **94**, 780-783.
- Cañas CR, Quiroz RA, León-Velarde C, Posadas A, Osorio J. 2003. Quantifying energy dissipation by grazing animals in harsh environments. *Journal of Theoretical Biology* **225**, 351-359.
- Caro T. *Zebra Stripes*. 2016. University of Chicago Press, Chicago, USA.
- Caro T, Argueta Y, Briolat ES, Bruggink J, Kasprosky M, Lake J, Mitchell MJ, Richardson S, How M. 2019. Benefits of zebra stripes: Behaviour of tabanid flies around zebras and horses. *PLoS ONE* **14**, e0210831.
- Caro T, Izzo A, Reiner RC, Walker H, Stankowich T. 2014. The function of zebra stripes. *Nature Communications* **5**, 3535.
- Chebel RC, Mendonça LG, Baruselli PS. 2018. Association between body condition score change during the dry period and postpartum health and performance. *Journal of Dairy Science* **101**, 4595-4614.
- Clapperton JL. 1964. The energy metabolism of sheep walking on the level and on gradients. *British Journal of Nutrition* **18**, 47-54.
- Coffey EL, Delaby L, Fitzgerald S, Galvin N, Pierce KM, Horan B. 2017. Effect of stocking rate and animal genotype on dry matter intake, milk production, body weight, and body condition score in spring-calving, grass-fed dairy cows.

- Journal of Dairy Science* **100**, 7556-7568.
- Cooper SM, Perotto-Baldivieso HL, Owens MK, Meek MG, Figueroa-Pagán M. 2008. Distribution and interaction of white-tailed deer and cattle in a semi-arid grazing system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **127**, 85-92.
- Dailey TV, Hobbs NT. 1989. Travel in alpine terrain: energy expenditures for locomotion by mountain goats and bighorn sheep. *Canadian Journal of Zoology* **67**, 2368-2375.
- Di Marco ON, Aello MS. 1998. Energy cost of cattle walking on the level and on a gradient. *Journal of Range Management* **51**, 9-13.
- Don BAC, Rennolls K. 1983. A home range model incorporating biological attraction points. *Journal of Animal Ecology* **52**, 69-81.
- Edmonson AJ, Lean IJ, Weaver LD, Farver T, Webster G. 1989. A body condition scoring chart for Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science* **72**, 68-78.
- Egri Á, Blahó M, Kriska G, Farkas R, Gyurkovszky M, Åkesson S, Horváth, G. 2012a. Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* **215**, 736-745.
- Egri Á, Blahó M, Sándor A, Kriska G, Gyurkovszky M, Farkas R, Horváth G. 2012b. New kind of polarotaxis governed by degree of polarization: attraction of tabanid flies to differently polarizing host animals and water surfaces. *Naturwissenschaften* **99**, 407-416.
- Egri Á, Blahó M, Száz D, Barta A, Kriska G, Antoni G, Horváth G. 2013. A new tabanid trap applying a modified concept of the old flypaper: Linearly polarising sticky black surfaces as an effective tool to catch polarotactic horseflies. *International Journal for Parasitology* **43**, 555-563.

- Eicher SD, Morrow-Tesch JL, Albright JL, Williams RE. 2001. Tail-docking alters fly numbers, fly-avoidance behaviors, and cleanliness, but not physiological measures. *Journal of Dairy Science* **84**, 1822-1828.
- Ferguson JD, Galligan DT, Thomsen N. 1994. Principal Descriptors of Body Condition Score in Holstein Cows. *Journal of Dairy Science* **77**, 2695-2703.
- Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard JM, Faverdin P. 2015. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science* **98**, 4465-4476.
- Frank E, Hall MA, Witten IH. 2016. *The WEKA workbench fourth edition Online appendix for "data mining: practical machine learning tools and techniques"*. The University of Waikato, Hamilton, New Zealand. [cited 8 June 2021]. Available from URL: https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/Witten_et_al_2016_appendix.pdf
- Fries JA, Kriss M. 1924. Metabolism of cattle during standing and lying. *American Journal of Physiology* **71**, 60-83.
- Gibson G. 1992. Do tsetse flies 'see' zebras? A field study of the visual response of tsetse to striped targets. *Physiological Entomology* **17**, 141-147.
- Gibson G, Torr SJ. 1999. Visual and olfactory responses of *haematophagous Diptera* to host stimuli. *Medical and Veterinary Entomology* **13**, 2-23.
- Gonyou HW, Stricklin WR. 1984. Diurnal Behavior Patterns of Feedlot Bulls During Winter and Spring in Northern Latitudes. *Journal of Animal Science* **58**, 1075-1083.
- Haixiang G, Yijing L, Shang J, Mingyun G, Yuanyue H, Bing G. 2017. Learning from class-imbalanced data: Review of methods and applications. *Expert Systems*

- with Applications* **73**, 220-239.
- Hall SJG. 1988. Chillingham Park and its Herd of White Cattle: Relationships Between Vegetation Classes and Patterns of Range Use. *Journal of Applied Ecology* **25**, 777-789.
- Hansen MF, Smith ML, Smith LN, Jabbar KA, Forbes D. 2018. Automated monitoring of dairy cow body condition, mobility and weight using a single 3D video capture device. *Computers in Industry* **98**, 14-22.
- Hayashi K, Ota M, Kato M, Chiba Y, Narita A. 1967. Seasonal and diurnal activities of biting insect attacking grazing cattle, with special reference to repellent-spraying. *Japanese Journal Zootechnical Science* **38**, 376-384.
- Hayward MW, Kerley GI. 2005. Prey preferences of the lion (*Panthera leo*). *Journal of Zoology* **267**, 309-322.
- Hessle A, Rutter M, Wallin K. 2008. Effect of breed, season and pasture moisture gradient on foraging behaviour in cattle on semi-natural grasslands. *Applied Animal Behaviour Science* **111**, 108-119.
- 広岡博之. 2009. 黒毛和種肥育牛におけるビタミンC投与がBMSナンバーに及ぼす影響—メタアナリシスによるアプローチ—. 肉用牛研究会報 **87**, 37-40.
- Hogan BG, Cuthill IC, Scott-Samuel NE. 2016. Dazzle camouflage, target tracking, and the confusion effect. *Behavioral Ecology*. **27**, 1547-1551.
- Hogsette JA, Prichard DL, Ruff JP. 1991. Economic effects of Horn Fly (Diptera: Muscidae) populations on beef cattle exposed to three pesticide treatment regimes. *Journal of Economic Entomology* **84**, 1270-1274.
- Hooven Jr NW. 1978. Cow identification and recording systems. *Journal of Dairy Science* **61**, 1167-1180.

- Horváth G, Blahó M, Kriska G, Hegedüs R, Gerics B, Farkas R, Åkesson S. 2010. An unexpected advantage of whiteness in horses: the most horsefly-proof horse has a depolarizing white coat. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **277**, 1643-1650.
- Horváth G, Majer J, Horváth L, Szivák I, Kriska G. 2008. Ventral polarization vision in tabanids: horseflies and deerflies (Diptera: Tabanidae) are attracted to horizontally polarized light. *Naturwissenschaften* **95**, 1093-1100.
- Horváth G, Pereszlényi Á, Åkesson S, Kriska G. 2019. Striped bodypainting protects against horseflies. *Royal Society Open Science* **6**, 181325.
- Horváth G, Pereszlényi Á, Száz D, Barta A, Jánosi IM, Gerics B, Åkesson S. 2018. Experimental evidence that stripes do not cool zebras. *Scientific Reports* **8**, 9351.
- Horváth G, Szörényi T, Pereszlényi Á, Gerics B, Hegedüs R, Barta A, Åkesson S. 2017. Why do horseflies need polarization vision for host detection? Polarization helps tabanid flies to select sunlit dark host animals from the dark patches of the visual environment. *Royal Society Open Science* **4**, 170735.
- How MJ, Zanker JM. 2014. Motion camouflage induced by zebra stripes. *Zoology* **117**,163-170.
- Howery LD, Provenza FD, Banner RE, Scott CB. 1996. Differences in home range and habitat use among individuals in a cattle herd. *Applied Animal Behaviour Science* **49**, 305-320.
- Hribar LJ, LePrince DJ, Foil LD. 1992. Ammonia as an attractant for adult *Hybomitra lasiophthalma* (Diptera: Tabanidae). *Journal of Medical Entomology* **29**, 346-348.
- Hull JL, Meyer JM, Lofgreen GP, Strother A. 1957. Studies on forage utilization by steers and sheep. *Journal of Animal Science* **16**, 757-765.

- 石井幹. 1986. 牛の行動学入門—よりよき飼養管理のために—. 中央畜産会. 東京.
- Kaps M, Lamberson W. 2009. *Biostatistics for Animal Science: An Introductory Text*. 2nd ed. CABI Publishing, Oxfordshire, UK.
- 加藤正信. 1980. 牛の放牧行動とエネルギー消費. 農林水産技術研究ジャーナル **3**, 33-37.
- 加藤正信. 1984. 和牛の放牧とその研究. 西日本畜産学会報 **27**, 1-6.
- Kaufmann JH. 1962. Ecology and social behavior of the coati, *Nasua narica* on Barro Colorado Island Panama. *University of California Publications in Zoology* **60**, 95-222.
- 喜田環樹, 中尾誠司, 進藤和政, 手島茂樹. 2020. 家畜の生体情報に基づく「放牧管理システム」. 日本草地学会誌 **66**, 166-170.
- 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター大田研究拠点粗飼料多給型高品質牛肉研究チーム. 2009. よくわかる移動放牧 Q&A. 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター太田研究拠点. 島根.
- 気象庁気象統計情報. 2008. 過去の気象データ検索. 気象庁, 東京, 2009年6月3日. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.
- 国立天文台天文情報センター暦計算室. 2008. 京都（京都府）: Kyoto のこよみ. 国立天文台, 東京, 2009年6月3日.
<http://www.nao.ac.jp/koyomi/dni/2008/hdni27082.html>
- 近藤誠司, 安江健, 佐々木均, 宮城圭希, 大久保正彦, 朝日田康司. 1993. 飛来昆虫が放牧牛の身づくろい行動に及ぼす影響. 北海道大学農学部牧場研究報告 **15**, 37-46.
- Kotsiantis SB. 2007. Supervised machine learning: A review of classification

- techniques. *Informatica* **31**, 249-268.
- Kotthoff L, Thornton C, Hoos HH, Hutter F, Leyton-Brown K. 2016. Auto-WEKA 2.0: Automatic model selection and hyperparameter optimization in WEKA. *Journal of Machine Learning Research* **17**, 1-5.
- 小山信明, 谷本保幸, 千田雅之. 2004. 中国中山間地域における耕作放棄地の放牧利用. 近畿中国四国農業研究センター研究報告 **3**, 47-55.
- Kramer CY. 1956. Extension of multiple range tests to group means with unequal numbers of replications. *Biometrics* **12**, 307-310.
- Kriska G, Bernáth B, Farkas R, Horváth G. 2009. Degrees of polarization of reflected light eliciting polarotaxis in dragonflies (Odonata), mayflies (Ephemeroptera) and tabanid flies (Tabanidae). *Journal of Insect Physiology* **55**, 1167-1173.
- Kristensen E, Dueholm L, Vink D, Andersen JE, Jakobsen EB, Illum-Nielsen S, Petersen FA, Enevoldsen C. 2006. Within-and across-person uniformity of body condition scoring in Danish Holstein cattle. *Journal of Dairy Science* **89**, 3721-3728.
- Kuzuhara Y, Kawamura K, Yoshitoshi R, Tamaki T, Sugai S, Ikegami M, Kurokawa Y, Obitsu T, Okita M, Sugino T, Yasuda T. 2015. A preliminary study for predicting body weight and milk properties in lactating Holstein cows using a three-dimensional camera system. *Computers and Electronics in Agriculture* **111**, 186-193.
- Lachica M, Prieto C, Aguilera JF. 1997. The energy costs of walking on the level and on negative and positive slopes in the Granadina goat (*Capra hircus*). *British Journal of Nutrition* **77**, 73-81.
- Lachica M, Aguilera JF. 2000. Estimation of the energy costs of locomotion in the Iberian pig (*Sus mediterraneus*). *British Journal of Nutrition* **83**, 35-41.

- Lachica M, Aguilera JF. 2005. Energy expenditure of walk in grassland for small ruminants. *Small Ruminant Research* **59**, 105-121.
- Larison B, Harrigan RJ, Thomassen HA, Rubenstein DI, Chan-Golston AM, Li E, Thomas BS. 2015. How the zebra got its stripes: a problem with too many solutions. *Royal Society Open Science* **2**, 140452.
- Li K, Zhou G, Zhai J, Li F, Shao M. 2019. Improved PSO_AdaBoost ensemble algorithm for imbalanced data. *Sensors* **19**, 1476.
- Linnane MI, Brereton AJ, Giller PS. 2001. Seasonal changes in circadian grazing patterns of Killarney National Park, Co. Kerry, Ireland. *Applied Animal Behaviour Science* **71**, 277-292.
- Liu D, He D, Norton T. 2020. Automatic estimation of dairy cattle body condition score from depth image using ensemble model. *Biosystems Engineering* **194**, 16-27.
- López V, Fernández A, García S, Palade V, Herrera F. 2013. An insight into classification with imbalanced data: Empirical results and current trends on using data intrinsic characteristics. *Information Sciences* **250**, 113-141.
- Luo G. 2016. A review of automatic selection methods for machine learning algorithms and hyper-parameter values. *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics* **5**, 1-16.
- Lysyk TJ. 1995. Temperature and population density effects on feeding activity of *Stomoxys calcitrans* (Diptera: Muscidae) on cattle. *Journal of Medical Entomology* **32**, 508-514.
- 萬田正治, 占部伸一郎, 柳田宏一. 1982. 入来牧場における吸血性昆虫の季節的および日周消長について. 鹿児島大学農学部農場研究報告 **7**, 1-10.
- Martins BM, Mendes ALC, Silva LF, Moreira TR, Costa JHC, Rotta PP, Chizzotti ML,

- Marcondes MI. 2020. Estimating body weight, body condition score, and type traits in dairy cows using three dimensional cameras and manual body measurements. *Livestock Science* **236**, 104054.
- McQueen RJ, Garner SR, Nevill-Manning CG, Witten IH. 1995. Applying machine learning to agricultural data. *Computers and Electronics in Agriculture* **12**, 275-293.
- Melin AD, Kline DW, Hiramatsu C, Caro T. 2016. Zebra stripes through the eyes of their predators, zebras, and humans. *PLoS ONE* **11**, e0145679.
- Mitchell BR. 2006. *Comparison of Programs for Fixed Kernel Home Range Analysis*. Remotely Wild 21. [cited 15 March 2010]. Available from URL: https://www.uvm.edu/~bmitchel/Publications/HR_Compare.pdf
- Moore TR, Slosser JE, Cocke J, Newton WH. 1996. Effect of trap design and color in evaluating activity of *Tabanus abactor* Philip in Texas rolling plains habitat. *The Southwestern Entomologist* **21**, 1-11.
- 守屋和幸, 吉村哲彦, 北川政幸, 小山田正幸, 杉本安寛. 2003. GPS 測位記録を利用したスギ (*Cryptomeria japonica* D Don) 幼齡林内における放牧牛の行動. 日本畜産学会報 **74**, 229-234.
- Mullens BA, Lii KS, Mao Y, Meyer JA, Peterson NG, Szijj CE. 2006. Behavioural responses of dairy cattle to the stable fly, *Stomoxys calcitrans*, in an open field environment. *Medical and Veterinary Entomology* **20**, 122-137.
- Mullins IL, Truman CM, Campler MR, Bewley JM, Costa JH. 2019. Validation of a commercial automated body condition scoring system on a commercial dairy farm. *Animals* **9**, 287.
- 中西良孝. 2002. 放牧. 日本草地学会九州支部会報 **32**, 127-131.
- Nagelkerke NJ. 1991. A note on a general definition of the coefficient of

determination. *Biometrika* **78**, 691-692.

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構編. 2009. 日本飼養標準(肉用牛). 中央畜産会. 東京.

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産研究部門編. 2017. 牧場管理効率化マニュアルー放牧馴致とマダニ対策編ー. 農研機構畜産研究部門技術レポート 17号. 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産研究部門. 茨城.

Normand ST. 1999. Meta-analysis: formulating, evaluating, combining, and reporting. *Statistics in Medicine* **18**, 321-359.

農林水産省. 2020. 酪農及び肉用牛生産の近代化を図るための基本方針. 農林水産省. 東京.

Ohshima K, Okada K, Numakunai S, Yoneyama Y, Sato S, Takahashi K. 1981. Evidence on Horizontal Transmission of Bovine Leukemia Virus due to Blood-sucking Tabanid Flies. *The Japanese Journal of Veterinary Science* **43**, 79-81.

奥村隆史. 1977. 放牧牛へのハエおよびアブの襲来と牛の尾払いおよび脚払い動作について. 日本応用動物昆虫学会誌 **21**, 119-122.

O'Leary N, Leso L, Buckley F, Kenneally J, McSweeney D, Shalloo L. 2020. Validation of an Automated Body Condition Scoring System Using 3D Imaging. *Agriculture* **10**, 246.

大野脇弥, 田中明. 1965. 乳用育成牛の放牧時における行動に関する研究 第 II 報 牛群の行動と地形および気象との関係について. 日本草地学会誌 **11**, 138-143.

太田典弘, 吉岡正行, 境米造. 家畜の放牧を利用した緩衝地帯などの整備と野生獣害(イノシシ・シカ)防止技術の確立(第3報)(緩衝地帯内の竹林における肉用牛放牧技術の確立). 京都府畜産技術センター試験研究成績 **6**,

138-143.

Osoro K, Wright IA. 1992. The effect of body condition, live weight, breed, age, calf performance, and calving date on reproductive performance of spring-calving beef cows. *Journal of Animal Science* **70**, 1661-1666.

Osuji PO. 1974. The physiology of eating and the energy expenditure of the ruminant at pasture. *Journal of Range Management* **27**, 437-443.

尾崎研一, 工藤琢磨. 2002. 行動圏 : その推定法, 及び観察点間の自己相関の影響. *日本生態学会誌* **52**, 233-242.

Oyarzún MP, Quiros A, Birkett MA. 2008. Insecticide resistance in the horn fly: alternative control strategies. *Medical and Veterinary Entomology* **22**, 188-202.

Palumbi AR. 2001. Humans as the world's greatest evolutionary force. *Science* **293**, 1786-1790.

Parsons CT, Momont PA, Delcurto T, Mcinnis M, Porath ML. 2003. Cattle Distribution Patterns and Vegetation Use in Mountain Riparian Areas. *Journal of Range Management* **56**, 334-341.

Patterson J, Gibson A. 2017. *Deep Learning: A Practitioner's Approach*. O'Reilly Media, Inc., California, USA.

Rathbun FM, Pralle RS, Bertics SJ, Armentano LE, Cho K, Do C, Weigel KA, White HM. 2017. Relationships between body condition score change, prior mid-lactation phenotypic residual feed intake, and hyperketonemia onset in transition dairy cows. *Journal of Dairy Science* **100**, 3685-3696.

Ribeiro JM de CR, Brockway JM, Webster AJF. 1977. A note on the energy cost of walking in cattle. *Animal Production* **25**, 107-110.

Richards MW, Spitzer JC, Warner MB. 1986. Effect of varying levels of postpartum nutrition and body condition at calving on subsequent reproductive performance

- in beef cattle. *Journal of Animal Science* **62**, 300-306.
- Roath LR, Krueger WC. 1982. Cattle grazing influence on a mountain riparian zone. *Journal of Range Management* **35**, 100-103.
- Roberts RH. 1977. Attractancy of two black decoys and CO₂ to tabanids (Diptera: Tabanidae). *Mosquito News* **37**, 169-172.
- Roche JR, Friggens NC, Kay JK, Fisher MW, Stafford KJ, Berry DP. 2009. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare. *Journal of Dairy Science* **92**, 5769-5801.
- Rutter N. 1968. Time lapse photographic studies of livestock behaviour outdoors on the College Farm, Aberystwyth. *Journal of Agricultural Science* **71**, 257-265.
- Sakai K, Oishi K, Miwa M, Kumagai H, Hirooka H. 2019. Behavior classification of goats using 9-axis multi sensors: The effect of imbalanced datasets on classification performance. *Computers and Electronics in Agriculture* **166**, 105027.
- Salau J, Haas JH, Junge W, Thaller G. 2017. A multi-Kinect cow scanning system: Calculating linear traits from manually marked recordings of Holstein-Friesian dairy cows. *Biosystems Engineering* **157**, 92-98.
- Samuel MD, Pierce DJ, Garton EO. 1985. Identifying Areas of Concentrated Use within the Home Range. *Journal of Animal Ecology* **54**, 711-719.
- Sasaki H. 2001. Comparison of capturing tabanid flies (Diptera: Tabanidae) by five different color traps in the fields. *Applied Entomology and Zoology* **36**, 515-519.
- Schauer CS, Bohnert DW, Ganskopp DC, Richards CL, Falck SJ. 2005. Influence of protein supplementation frequency on cows consuming low-quality forage: Performance, grazing behavior, and variation in supplement intake. *Journal of*

- Animal Science* **83**, 1715-1725.
- Schlecht E, Hülsebusch C, Mahler F, Becker K. 2004. The use of differentially corrected global positioning system to monitor activities of cattle at pasture. *Applied Animal Behaviour Science* **85**, 185-202.
- Schofield S, Torr SJ. 2002. A comparison of the feeding behaviour of tsetse and stable flies. *Medical and Veterinary Entomology* **16**, 177-185.
- Seaman DE, Griffith B, Powell RA. 1998. KERNELHR: a program for estimating animal home ranges. *Wildlife Society Bulletin* **26**, 95-100.
- Seaman DE, Millspaugh JJ, Kernohan BJ, Brundige GC, Raedeke KJ, Gitzen RA. 1999. Effects of sample size on kernel home range estimates. *Journal of Wildlife Management* **63**, 739-747.
- 千田雅之. 2006. 中山間地域における農用地の畜産的利用の経営的評価と耕作放棄地解消の条件. *日本草地学会誌* **52**, 124-128.
- 千田雅之. 2010. 放牧畜産発展の課題と水田を活用した放牧時季の延長技術. *日本暖地畜産学会報* **53**, 17-23.
- 千田雅之. 2012. 水田放牧のリスクマネジメント試論. *関東東海農業経営研究* **102**, 65-70.
- 千田雅之. 2016. 放牧方式等の相違による肉用牛繁殖経営の収益性比較. *農業経営研究* **54**, 91-96.
- Shibata M, Mukai A, Kume S. 1981. Estimation of energy expenditure in dairy heifers walking on the level and on gradients. *Bulletin of the Kyushu National Agricultural Experiment Station* **21**, 589-609.
- Silva SR, Araujo JP, Guedes C, Silva F, Almeida M, Cerqueira JL. 2021. Precision Technologies to Address Dairy Cattle Welfare: Focus on Lameness, Mastitis and Body Condition. *Animals* **11**, 2253.

- Silvy NJ, Lopez RR, Peterson MJ. 2005. Wildlife marking techniques. In: Braun CE (ed.) *Techniques for Wildlife Investigations and Management 6th ed.* pp. 339-376. The Wildlife Society, Bethesda, USA.
- Song X, Bokkers EAM, Van Mourik S, Koerkamp PG, van Der Tol PPJ. 2019. Automated body condition scoring of dairy cows using 3-dimensional feature extraction from multiple body regions. *Journal of Dairy Science* **102**, 4294-4308.
- Spoliansky R, Edan Y, Parmet Y, Halachmi I. 2016. Development of automatic body condition scoring using a low-cost 3-dimensional Kinect camera. *Journal of Dairy Science* **99**, 7714-7725.
- Stevenson JS, Johnson SK, Milliken GA. 2003. Incidence of postpartum anestrus in suckled beef cattle: treatments to induce estrus, ovulation, and conception. *The Professional Animal Scientist* **19**, 124-134.
- 杉本安寛, 松岡陽平, 守屋和幸. 2005. 水飲み場の移動が林内放牧牛の行動圏に及ぼす影響. 日本畜産学会報 **76**, 39-49.
- Swain DL, Wark T, Bishop-Hurley GJ. 2008. Using high fix rate GPS data to determine the relationships between fix rate, prediction errors and patch selection. *Ecological Modelling* **212**, 273-279.
- 高橋茂, 河原孝吉, 栗生要, 今井敬, 堂地修. 2016. 3D 画像解析による牛の尻のフェイス面積と生産形質の関連. 酪農学園大学紀要. 自然科学編 **40**, 79-86.
- 丹後俊郎. 2002. メタ・アナリシス入門 エビデンスの統合をめざす統計手法. 朝倉書店. 東京.
- Taylor CR, Heglund NC, Maloiy GM. 1982. Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. I. Metabolic energy consumption as a function of speed and body size in birds and mammals. *Journal of Experimental Biology* **97**, 1-21.
- Taylor DB, Moon RD, Mark D. 2012. Economic impact of stable flies (*Diptera*:

- Muscidae*) on dairy and beef cattle production. *Journal of Medical Entomology* **49**, 198-209.
- Thomas CK, Pearson RA. 1986. Effects of ambient temperature and head cooling on energy expenditure, food intake and heat tolerance of Brahman and Brahman x Friesian cattle working on treadmills. *Animal Production* **43**, 83-90.
- Thompson PH. 1969. Collecting methods for Tabanidae (Diptera). *Annals of the Entomological Society of America* **62**, 50-57.
- Thornton C, Hutter F, Hoos HH, Leyton-Brown K. 2013. Auto-WEKA: Combined selection and hyperparameter optimization of classification algorithms. *In Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 847-855.
- Thorsteinson AJ. 1958. The orientation behavior of horseflies and deerflies (Tabanidae: Diptera). I. The attractance of heat to tabanids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **1**, 191-196.
- Thorup VM, Edwards D, Friggens NC. 2012. On-farm estimation of energy balance in dairy cows using only frequent body weight measurements and body condition score. *Journal of Dairy Science* **95**, 1784-1793.
- 梅村 恭子. 2007. 放牧による自給率向上. 畜産の研究 **61**, 91-95.
- 辻井 弘忠. 2005. 日本における放牧の現状. 信州大学農学部 AFC 報告 **40**, 1-5.
- Uchida H, Kobayasi J, Inoue T, Suzuki K, Oikawa T. 2002. Current level of reproductive performances in Japanese Black cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **15**, 1098-1102.
- United States Department of Agriculture (USDA), Animal and Plant Health Inspection Service. 1998. Nutritional management in beef cow-calf herds [homepage on the Internet]. United States Department of Agriculture (USDA),

- Animal and Plant Health Inspection Service, Colorado, USA; [cited 12 November 2021]. Available from URL: https://www.aphis.usda.gov/animal_health/nahms/beefcowcalf/downloads/beef97/Beef97_is_NutMgmt.pdf
- Vallentine JF. 2001. *Grazing Management* 2nd edn. Academic Press, San Diego, USA.
- Vercoe JE. 1973. The energy cost of standing and lying in adult cattle. *British Journal of Nutrition* **30**, 207-210.
- Waage JK. 1981. How the zebra got its stripes – biting flies as selective agents in the evolution of zebra colouration. *Journal of the Entomological Society of Southern Africa* **44**, 351-358.
- Wagner MW, Havstad KM, Doornbos DE, Ayers EL. 1986. Forage intake of rangeland beef cows with varying degrees of crossbred influence. *Journal of Animal Science* **63**, 1484-1490.
- 渡辺高俊. 1984. 乳牛の能力診断と飼養. 農山漁村文化協会, 東京.
- 渡辺也恭, 吉利怜奈, 林志炫, 堤道生. 2020. 放牧畜産の可能性-島根県邑南町須摩谷農場の事例から-. 日本草地学会誌 **66**, 103-107.
- White RG, Yousef MK. 1978. Energy expenditure in reindeer walking on roads and on tundra. *Canadian Journal of Zoology* **56**, 215-223.
- Wilson BH, Tugwell NP, Burns EC. 1966. Attraction of tabanids to traps baited with dry-ice under field conditions in Louisiana. *Journal of Medical Entomology* **3**, 148-149.
- 八木満寿雄, 犬童幸人, 美濃貞治郎, 滝本勇治, 中西雄二. 1983. 放牧された肉用牛の行動型, 歩行時の傾斜角度, 歩行速度について. 九州農業試験場報告 **23**, 321-335.
- 山中成元, 上田栄一, 藤井吉隆. 2008. 放牧ゾーニングによるイノシシの農作物

被害防止効果と多面的効果．滋賀県農業技術振興センター研究報告 **47**,
51-60.

安江 健，佐藤 衆介．2005．無牧柵林間放牧下での家畜ウシの採餌行動と管理．
哺乳類科学 **45**, 105-110.

Yousef MK, Dill DB. 1969. Energy expenditure in desert walks: man and burro *Equus asinus*. *Journal of Applied Physiology* **27**, 681-683.

Yousef MK, Dill DB, Freeland DV. 1972. Energetic cost of grade walking in man and burro, *Equus asinus*: desert and mountain. *Journal of Applied Physiology* **33**, 337-340.

公益社団法人全国和牛登録協会．2017．和牛登録事務必携．公益社団法人全国和牛登録協会，京都．

業績リスト

第 2 章 参考文献:

兒嶋朋貴, 大石風人, 太田典宏, 吉岡正行, 熊谷元, 守屋和幸, 広岡博之. 2010.

佇立時に対する水平および傾斜歩行時のエネルギー消費量比の推定式作成とそれを用いた耕作放棄地放牧牛のエネルギー消費量の推定. 日本畜産学会報 **81**, 189-197.

<https://doi.org/10.2508/chikusan.81.189>

第 3 章 参考文献:

兒嶋朋貴, 大石風人, 太田典宏, 吉岡正行, 熊谷元, 守屋和幸, 広岡博之. 2010.

GPS および GIS を用いた放牧牛の耕作放棄地における空間的利用パターンとそのエネルギー消費量との関係. システム農学 **26**, 141-149.

https://doi.org/10.14962/jass.26.4_141

第 4 章 参考文献:

Kojima T, Oishi K, Matsubara Y, Uchiyama Y, Fukushima Y, Aoki N, Sato S, Masuda

T, Ueda J, Hirooka H, Kino K. 2019. Cows painted with zebra-like striping can avoid biting fly attack. *PLoS ONE* **14**, e0223447.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223447>

第 5 章 参考文献:

Kojima T, Oishi K, Aoki N, Matsubara Y, Uete T, Fukushima Y, Inoue G, Sato S,

Shiraishi T, Hirooka H, Masuda T. 2022. Estimation of beef cow body condition score: a machine learning approach using three-dimensional image data and a simple approach with heart girth measurements. *Livestock Science* **256**, 104816.

<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104816>