

黒毛和種肥育牛の栄養代謝に及ぼす暑熱環境の影響解明と
制御に関する研究

筑波大学大学院
生命環境科学研究科
先端農業技術科学専攻
博士（農学）学位論文

前田 友香

目 次

第 1 章	緒論	
1.1	気候変動と家畜の生産性-----	1
1.2	反芻家畜の暑熱対策に関する既往の研究-----	3
1.3	本研究の目的と概要-----	5
第 2 章	暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼料摂取量，発育， 血液成分，および飼料消化性に及ぼす影響	
	緒言-----	6
1 節	飼料摂取量，発育，および血液成分への影響	
2.1.1	目的-----	8
2.1.2	材料および方法-----	10
2.1.3	結果-----	13
2.1.4	考察-----	15
2.1.5	要約-----	20
2.1.6	図表-----	21
2 節	飼料消化性および第一胃液性状への影響	
2.2.1	目的-----	25
2.2.2	材料および方法-----	27
2.2.3	結果-----	30
2.2.4	考察-----	31
2.2.5	要約-----	34

2.2.6	図表-----	35
第3章	飼料の制限給与が黒毛和種去勢肥育牛の飼料摂取量，発育， 枝肉成績，および飼料消化性に及ぼす影響	
	緒言-----	39
1節	暑熱期の飼料消化性および第一胃液性状への影響	
3.1.1	目的-----	41
3.1.2	材料および方法-----	43
3.1.3	結果-----	46
3.1.4	考察-----	47
3.1.5	要約-----	50
3.1.6	図表-----	51
2節	発育，飼料摂取量，および枝肉成績への影響	
3.2.1	目的-----	57
3.2.2	材料および方法-----	58
3.2.3	結果-----	60
3.2.4	考察-----	62
3.2.5	要約-----	67
3.2.6	図表-----	68
第4章	制限給与下の黒毛和種肥育後期牛への暑熱期における木材 クラフトパルプの給与が飼料摂取量，発育，飼料消化性， および第一胃発酵に及ぼす影響	

4.1	緒言	75
4.2	材料および方法	77
4.3	結果	81
4.4	考察	83
4.5	要約	89
4.6	図表	90
第 5 章	総括	101
	図表	108
	Summary	112
	引用文献	115
	謝辞	127

略語一覧

A/G 比 (albumin/globulin ratio; A/G ratio)

アルブミン (albumin; Alb)

アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ (aspartate aminotransferase; AST)

ビタミン A (vitamin A; VA)

中性デタージェント繊維 (neutral detergent fiber; NDF)

中性脂肪 (triglyceride; TG)

エンドトキシン (lipopolysaccharide; LPS)

グロブリン (globulin; Glb)

牛脂肪交雑基準 (beef marbling standard score; BMS)

乾物 (dry matter; DM)

カルシウム (calcium; Ca)

可消化養分総量 (total digestible nutrients; TDN)

血中尿素窒素 (blood urea nitrogen; BUN)

揮発性脂肪酸 (volatile fatty acid; VFA)

無機リン (inorganic phosphorus; IP)

日増体量 (daily gain; DG)

粗脂肪 (ether extract; EE)

粗蛋白質 (crude protein; CP)

総コレステロール (total cholesterol; T-Cho)

総蛋白質 (total protein; TP)

有機物 (organic matter; OM)

第 1 章 緒論

1.1 気候変動と家畜の生産性

近年、気候変動による地球規模での平均気温の上昇が深刻な問題として注目されている。気候変動に関する政府間パネル第 5 次評価報告によれば、世界平均地上気温は 1880 年から 2012 年の期間で 0.85°C 上昇しており、21 世紀末における平均気温は現在よりも更に 1.8°C から 3.8°C 上昇すると予想されている（環境省 2015）。わが国においては、平均気温は 1898 年以降、1.1°C 上昇している（気象庁 2018）。加えて、今後は平均気温のさらなる上昇と、真夏日や猛暑日の増加が予測されている（気象庁 2017）。

夏季の高温が家畜の生産性を低下させることは、これまでも問題点として認識されてきた。家畜の生産性には多くの環境要因が関連しているが、中でも暑熱環境は家畜の恒温性に直接作用するため、生産性に及ぼす影響は大きい。すなわち、暑熱環境は、泌乳量、成長と肥育、繁殖などと密接に関連している（三村と森田 1980）。野中ら（2009）は、日本においては気候変動による気温上昇により暑熱が家畜の生産性に影響する範囲が拡大するとともに、現在と比較して家畜の生産性および生産物の品質が低下することを報告している。気温上昇が継続していることから、わが国の畜産業は暑熱による生産性低下のリスクが高まっていると考えられる。

暑熱環境が家畜の生産性に及ぼす影響として、乳用牛では飼料摂取量および泌乳量の減少（West 2003）や繁殖性の低下（De Rensis と Scaramuzzi 2003）が報告されている。一方、肉用牛は乳用牛に比べて暑熱への耐性は高いと考えられているが（三村と森田 1980; 阪谷 2015）、飼料摂取量の減少（Brown-Brandle ら 2005; Mader ら 2006;

Arias と Mader (2011) や発育の鈍化 (Brown-Brandle ら 2005) も報告されている。ただし、これらの知見は外国種の肉用牛を対象とした研究であり、日本における暑熱環境と黒毛和種肥育牛の生産性に関する知見は少ない。

黒毛和種はわが国固有の肉用品種であり、国内で飼養されている和牛頭数の 95%以上を占めている (農林水産省 2018)。一般に、黒毛和種去勢牛の肥育は、9 カ月齢から 29 カ月齢の 20 カ月間である (農林水産省 2015)。肥育期間は前期、中期、および後期の 3 期に区分され、それぞれの肥育ステージで粗飼料と濃厚飼料の給与割合や飼料中の CP 含量を変えて飼養されている (独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009)。給与飼料中の濃厚飼料割合および濃厚飼料の CP 含量は、肥育前期では 50~80% および 11~16%、肥育中期と肥育後期では 80~90% および 10~13% である (井上 2005; 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009)。肥育中期の血中 VA 濃度と枝肉価格に直接影響する BMS に負の相関関係が認められているため (Oka ら 1998a)、肥育中期では VA の給与が制限され、脂肪交雑の増加に努めている。このような独特の肥育は、黒毛和種肥育素牛の消化器、骨格、および筋肉の発達と、肉質の向上を考慮した結果とされている (独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009)。

一方、このような黒毛和種の肥育体系は、生産性低下のリスクを抱える。すなわち、濃厚飼料の多給は易発酵性炭水化物の多量摂取につながり、第一胃発酵の恒常性を阻害する (Owens ら 1998)。VA 給与の制限による血中 VA 濃度の過度な低下は、飼料摂取量を減少させ (甫立ら 2004)、発育が鈍化する (Oka ら 1998b)。加えて、肥育期間が長期化すると、飼料効率が低下する (三津本ら 1989; 独立行政法人農

業・食品産業技術総合研究機構 2009). このように、黒毛和種の肥育は、栄養管理面において生産性が低下しやすい体系であり、暑熱の影響が加わることで、生産性低下のリスクがさらに高まると考えられる。実際、黒毛和種の肥育期間は20カ月間（農林水産省 2015）の長期であり、肥育牛は夏季の暑熱環境を必ず経験することとなる。したがって、暑熱環境は黒毛和種の肥育において生産性に影響を及ぼす大きな環境要因となり得る。

1.2 反芻家畜の暑熱対策に関する既往の研究

家畜の体温は、体内の産熱と熱放散、およびその熱収支によって決定される。反芻家畜は暑熱時に飼料摂取量を低下させ、採食による産熱量と第一胃における発酵熱を減少させることで、体温の上昇を抑制する（三村と森田 1980）。しかし、飼料摂取量の減少はエネルギー摂取量の減少を伴い、さらに暑熱環境下では適温環境下に比べて熱放散に要するエネルギー消費量が増加する（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）。結果として、家畜に蓄積あるいは生産へ振り分けるエネルギーは減少することとなる（山本 1992）。したがって、反芻家畜における暑熱対策の最も効果的な方法は体温の上昇を抑制することと指摘されている（向居 1978; 阪谷 2015）。

肥育牛は濃厚飼料のようなエネルギー濃度の高い飼料を多給されるため、代謝熱負荷が増加し（Gaughan ら 1996）、体温が上昇しやすい。また、代謝熱負荷の増加は熱放散に要するエネルギーの増加を伴い、エネルギー消費量が増加する（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）。そのため、肥育牛は、暑熱環境下においてエネルギーの損失が増大している可能性が考えられる。そこで、エネルギー摂

取量を制限し，代謝熱負荷の抑制と維持エネルギーの低減を図り，暑熱時の生産性を改善する技術が検討されている．これまでに，フィードロット交雑種において飼料の給与量を制限することで，暑熱時の飼料摂取量減少の抑制（Mader ら 2002）や体温上昇の抑制（Mader ら 2002; Davis ら 2003）につながる事が明らかになっている．一方，黒毛和種肥育牛では飼料給与量の制限による肉質への影響が報告されている（村元ら 2002; 坂下ら 2004）が，暑熱環境下における生産性への影響については明らかにされていない．

また，黒毛和種の肥育で粗飼料として給与されている稲わらは，繊維消化性が低く低質粗飼料に区分される（永西 2002; 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．しかし，暑熱期に低質粗飼料を給与すると発酵熱が増加し，暑熱ストレスが増長されることから（Fuquay 1981），暑熱期に給与する繊維成分は消化性の良いものが薦められている（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．消化性に優れる繊維質飼料として，近年，木材クラフトパルプ（KP）が開発されている．KP は NDF 主体の飼料でありながら TDN 含量は圧ペントウモロコシと同程度であることが示されており（Hada ら 2012），飼料のエネルギー含量を低下させることなく，良質な繊維成分を供給することが可能と考えられる．また，乳用牛へ KP を給与すると，第一胃発酵の安定に寄与することが示されている（Nishimura ら 印刷中）．そのため，黒毛和種肥育牛への KP 給与は，暑熱期の採食によるエネルギー損失の抑制と第一胃発酵の安定化に寄与するものと考えられるが，これまでにこれに関する知見はない．

1.3 本研究の目的と概要

黒毛和種肥育牛においては，暑熱による生産性への影響は明確にされておらず，そのため具体的な暑熱対策についてもほとんど検討されていない．しかし，黒毛和種の肥育は生産性が低下しやすい飼養体系であることや，今後日本の気温は上昇することが予測されていることから，将来，わが国における黒毛和種肥育牛の生産性は大幅に低下する可能性が考えられる．

そこで，本研究では暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の生産性へ及ぼす影響を明らかにすることと，暑熱の影響を緩和する栄養管理技術を検討することを目的とした．すなわち，第 2 章 1 節では暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼料摂取量，発育，および血液成分に及ぼす影響を肥育ステージごとに解析し，各肥育ステージにおける暑熱の影響について考察した．同章 2 節では暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼料消化性に及ぼす影響を考察した．さらに，第 3 章と第 4 章では黒毛和種肥育牛への暑熱対策技術を検討した．まず，第 3 章では代謝熱負荷および維持エネルギーの低減を目的に黒毛和種去勢肥育牛へ飼料の制限給与を実施し，暑熱期の飼料消化性や飼養成績に及ぼす影響について考察した．次に，第 4 章では良質な繊維成分の給与による第一胃発酵の安定化を目的に暑熱期に制限給与体系で飼養する黒毛和種肥育牛へ給与する濃厚飼料の一部を KP に代替した場合の影響について考察した．

第 2 章 暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼料摂取量，発育， 血液成分，および飼料消化性に及ぼす影響

緒言

気候変動に関する政府間パネル第 5 次評価報告によれば，世界平均地上気温は 1880 年から 2012 年の期間で 0.85℃上昇しており，今後も 21 世紀末に向けて上昇することが予測されている（環境省 2015）．このことはわが国においても例外ではなく，今後日本の平均気温は継続的に上昇し，真夏日や猛暑日の日数は増加することが予測されている（気象庁 2017）．このような気温の上昇は，家畜の生産性に影響を及ぼす可能性が考えられる．

夏期の暑熱環境が家畜の生産性を低下させることは，これまでも報告されている．恒温動物である家畜は，高温環境下では体内の熱平衡を保つため呼吸数の増加，発汗の促進，血管末梢の拡張，および心拍数の増加などの熱放散活動を活発化させるが，これはエネルギー要求量の増大につながる（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．加えて，反芻家畜は暑熱時に飼料摂取量を低下させ，採食による産熱量と第一胃における発酵熱を減少させることで，体温の上昇を抑制する（三村と森田 1980）．したがって暑熱環境下における反芻家畜は，蓄積や生産に振り分けるエネルギーが減少し（山本 1992），適温環境下に比べて生産性が低下する可能性が高い．このため，今後予測されている気温の上昇により家畜は暑熱環境に曝されるリスクが増大し，生産性が大幅に低下する可能性が考えられる．野中ら（2009）は，家畜の生産性と暑熱環境の関係に関する既往の知見と気候変化メッシュデータを用いて，温暖化がわが国の将来の家畜生産に及ぼす影響を評価した．その結果，温暖化により暑熱が家畜の生産性に影響す

る範囲が拡大するとともに、生産性や生産物の品質が低下することを指摘している（野中ら 2009）。これらのことから、今後家畜の生産性を維持するためには、暑熱環境が家畜の生産性に及ぼす影響を把握し、生産性低下を抑制する適切な暑熱対策を実施する必要がある。

暑熱環境が乳用牛の生産性に及ぼす影響として、飼料摂取量および泌乳量の減少（West 2003）と繁殖性の低下（De Rensis と Scaramuzzi 2003）が認められている。一方で、肉用牛は乳用牛よりも暑熱による生産性への影響は少ないとされているが（三村と森田 1980；阪谷 2015）、海外の肉用牛では暑熱の影響による飼料摂取量の減少（Brown-Brandle ら 2005；Mader ら 2006；Arias と Mader 2011）や増体の鈍化（Brown-Brandle ら 2005）が認められている。しかしながら、暑熱環境が黒毛和種肥育牛の生産性に及ぼす影響についてはほとんど知見がない。

そこで本章では、暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の生産性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、1 節で飼料摂取量、発育、および血液性状に及ぼす影響を検討するとともに、2 節で飼料消化性に及ぼす影響について検討した。

1 節 飼料摂取量，発育，および血液成分への影響

2.1.1 目的

暑熱環境が家畜の生産性に及ぼす影響として，乳用牛では飼料摂取量の減少（早坂ら 1988; 早坂と山岸 1990; West 2003; Tajima ら 2007），発育の停滞（早坂ら 1988; Tajima ら 2007），および乳量の減少（West 2003）が報告されている．一方で，肉用牛は乳牛よりも暑熱による影響は少ないとされているものの（三村と森田 1980; 阪谷 2015），海外の肉用牛では暑熱の影響により飼料摂取量が減少することが報告されている（Brown-Brandle ら 2005; Mader ら 2006; Arias と Mader 2011）．さらに，暑熱時期の肉用牛における飼料摂取量の減少は発育鈍化を招く（Brown-Brandle ら 2005）．これらのことから，暑熱環境は黒毛和種肥育牛においても飼料摂取量や発育等に影響を及ぼしているものと考えられるが，関連する知見は少ない．

黒毛和種の肥育は 9 カ月齢から 29 カ月齢の 20 カ月間が一般的である（農林水産省 2015）．肥育期間は肥育前期，中期，および後期の 3 期に区分され，それぞれの肥育ステージで給与飼料の粗濃比や CP 含量を変えて飼養される（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．肥育前期は中期以降の長期の濃厚飼料多給に備えて，腹，骨格，および筋肉づくりを中心に行う時期であり，良質な粗飼料を多給し，濃厚飼料には肥育中後期よりも TDN 含量が低く CP 含量が高いものが給与されている（井上 2005; 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．肥育中期以降は，筋肉内脂肪の形成と蓄積に重点を置き，濃厚飼料には肥育前期よりも TDN 含量が高く CP 含量が低いものを飽食給与する方法が広く行われている（井上 2005; 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．また，肥育中期の血

中 VA 濃度と BMS には負の相関関係が認められていることから (Oka ら 1998a), 脂肪交雑増加のために肥育中期では VA の給与が制限されている。

しかし, 易発酵性炭水化物を多く含む濃厚飼料を多量摂取すると, 第一胃発酵の恒常性が阻害されることが報告されている (Owens ら 1998). 血中 VA 濃度の過度な低下は飼料摂取量の減少と発育の鈍化を招く可能性がある (Oka ら 1998b; 甫立ら 2004). 肥育の進行により脂肪が蓄積されると飼料効率は低下することが示されている (三津本ら 1989). したがって, 黒毛和種の肥育は栄養管理面において生産性が低下しやすい体系であり, このような体系に暑熱の影響が加わると生産性低下のリスクがさらに高まると考えられる. 実際, 黒毛和種の肥育期間は前述のとおり 20 カ月間であることから, 肥育牛は必ず夏季の暑熱環境を経験するが, どの肥育ステージで暑熱期を迎えるのかは, 導入の時期により変動する. これらのことから, 黒毛和種肥育牛の生産性に対する暑熱の影響を肥育ステージごとに把握することは, 今後暑熱対策を検討していく上で重要な課題である.

そこで本節では, 暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼料摂取量, 発育, および血液成分へ及ぼす影響について明らかにするために, 宮崎県畜産試験場で飼養した肥育牛 63 頭の飼養成績および血液成分値を肥育ステージごとに暑熱環境と適温環境に分類して解析した.

2.1.2 材料および方法

1) 供試牛および時期区分

飼養成績の解析は、宮崎県畜産試験場（以下、試験場）において 2009 年 1 月から 2014 年 12 月までの期間に飼養した肥育牛のうち、臨床的に健康な黒毛和種去勢牛 63 頭のデータを用いて行った。肥育ステージの区分は、肥育開始の 10 カ月齢から 14 カ月齢までの 5 カ月間を前期、15 カ月齢から 22 カ月齢までの 8 カ月間を中期、そして 23 カ月齢から 28 カ月齢までの 6 カ月間を後期とした。環境条件による時期の区分は、宮崎県延岡市、宮崎市、都城市および日南市の 4 地点における 2009 年 1 月から 2014 年 12 月までの気温および湿度のデータ（気象庁 2016）を用いて、月ごとの平均気温、平均湿度、および平均 Temperature Humidity Index (THI) を算出し ($THI = (気温 \times 0.8) + [(湿度 / 100) \times (気温 - 14.4)] + 46.4$)、THI が 68 以上を示した 6、7、8、および 9 月を暑熱期、68 未満であった他の月を適温期とした（Zimbelman ら 2011）（Table 2.1.1）。なお、肥育開始月別の頭数は、それぞれ、1 月が 10 頭、3 月が 36 頭、7 月が 6 頭、8 月が 4 頭、そして 12 月が 7 頭であった。

2) 飼料摂取量、発育、および血液成分

給与飼料は、日本飼養標準・肉用牛（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）と日本標準飼料成分表（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2010）に基づき、試験場の慣行飼料を用いて設計した。設計においては、10 カ月齢時における肥育開始時体重を 300kg、肥育期間中の平均日増体量（DG）を 0.8 kg/日、肥育を終了する 28 カ月齢時における目標出荷時体重を 750kg と設定した。肥育ス

テージごとの濃厚飼料と粗飼料の給与量を Table 2.1.2 に示した。濃厚飼料は、市販の配合飼料をベースに、肥育前期にはトウモロコシ、ふすま、および大豆粕を混合したものをを用いた。配合飼料は肥育ステージごとに切り替えて、肥育前期に市販肥育前期用飼料（商品名：宮崎しもふり特号，南日本くみあい飼料）（TDN 73.5%，CP 13.0%（保証値，原物中含量）），肥育中期に市販肥育後期用飼料（商品名：宮崎しもふり後期用，南日本くみあい飼料）（TDN 73.0%，CP 12.0%（保証値，原物中含量）），および肥育後期に市販肥育仕上用飼料（商品名：宮崎しもふり特号仕上用，南日本くみあい飼料）（TDN 74.0%，CP 10.6%（保証値，原物中含量））を用いた。なお，各配合飼料の原物 1 kg 当たりの VA 含量は，市販肥育前期用飼料は 1,200 IU，市販肥育後期用飼料は 190 IU，市販肥育仕上用飼料は 600 IU であった。粗飼料には，肥育前期はチモシー乾草およびアルファルファヘイキューブを用い，肥育中期および後期には稲わらを用いた。

濃厚飼料の 1 日当たりの給与量は，体重が 300 kg から肥育中期の 16 カ月齢に相当する 450 kg に発育するまで，3 kg から最大 9 kg まで漸増させた。濃厚飼料は半量ずつ 9:00 および 16:00 に給与し，粗飼料は飽食給与とした。1 日の飼料摂取量は，濃厚飼料と粗飼料の残餌量を別々に測り，給与量から残餌量を差し引いて求めた。なお，供試牛は単房で飼養し，鈹塩および水は自由摂取とした。

体重は 4 週ごとに 13:00 に測定した。血液は 12 週ごとに 13:00 に頸静脈から採取し，直ちに遮光保冷し，遠心分離（1870×g，15min，4℃）した。その後血漿を採取して，分析に使用するまで -30℃で凍結保存した。各種血漿成分（TP，Alb，グロブリン（Glb），T-cho，TG，AST，BUN，Ca，IP，ならびに VA）の含量は，株式会社リンテック（福岡）

に分析を依頼した。なお、肥育中期 15 から 16 カ月齢時のサンプルについては、給与飼料変更の影響を大きく受けていることから、解析から除外した。

動物の飼育および動物を使用した実験については、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のガイドラインに従って実施した。

3) 統計解析

データの解析に当たって、該当する時期の月ごとの成績を個体ごとの反復測定値として整理し、SAS MIXED プロシジャを用いて、以下のモデルにより解析した (JMP[®] 12; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)。

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_k + e_{ijk}$$

Y_{ijk} : 測定値

μ : 総平均

α_i : 飼料区 i の効果

β_{ij} : 飼料区 i における個体 j の効果

γ_k : 処理 (時期) 区 k の効果

e_{ijk} : 誤差 ijk

なお、飼料区と個体は変量模型として取り扱った。また、F 検定により、危険率 5%未満の場合を有意差があるものとした。

2.1.3 結果

肥育牛の各ステージにおける飼料摂取量および発育成績に関する項目について、暑熱期および適温期の比較を Table 2.1.3 に示した。本研究においては、全ての肥育ステージの両時期間において平均日齢や平均体重に差が認められた ($P < 0.01$)。これは、供試牛の肥育開始月が 63 頭中 36 頭は 3 月であり、肥育開始月に偏りがあったことが影響している。したがって、結果の表示および考察には代謝体重当たりの飼料摂取量、TDN 摂取量、および CP 摂取量を用いた。

代謝体重当たりの飼料摂取量は、肥育前期は適温期に比べて暑熱期に減少する傾向を示し ($P = 0.069$)、中期は適温期と比べて暑熱期に多く ($P < 0.05$)、後期は適温期と比べて暑熱期に少なかった ($P < 0.05$) (Table 2.1.3)。また、代謝体重当たりの TDN 摂取量は、肥育前期および中期は暑熱期に適温期より有意に増え、逆に後期は暑熱期に適温期よりも有意に減少した (Table 2.1.3)。飼料摂取量に占める濃厚飼料の割合は、肥育前期および後期の暑熱期は適温期と比べて有意に高まったが、肥育中期は両時期とも同程度であった (Table 2.1.3)。各肥育ステージにおける DG および飼料効率は、肥育前期および後期は暑熱期が適温期よりも低値を示し ($P < 0.05$)、肥育中期でも暑熱期が適温期より低くなったが、両時期間に有意差は認められなかった (Table 2.1.3)。

暑熱期と適温期の血液成分の比較について Table 2.1.4 に示した。TP 濃度はいずれのステージでも両時期間に差はなかったが、肥育前期において Alb 濃度が適温期に比べて暑熱期に低くなった ($P < 0.05$) ため、暑熱期の A/G 比が低下した ($P < 0.05$)。肥育中期および後期は両時期の Alb、Glb および A/G 比に差は認められなかった。T-

cho 濃度は，肥育前期で適温期よりも暑熱期に低い傾向 ($P = 0.082$) を示し，肥育中期および後期でも暑熱期は同様に低下した ($P < 0.05$) など，すべての肥育ステージにおいて暑熱期は適温期よりも低値で推移した．BUN 濃度は，肥育前期および後期は適温期よりも暑熱期に低下した ($P < 0.05$) が，肥育中期は両時期とも同程度であった．暑熱期の IP 濃度は適温期に比べて，肥育前期は低くなった ($P < 0.05$) が，中期は逆に高く ($P < 0.05$) なり，後期は差が認められなかった．血中 VA 濃度は，肥育前期および中期は両時期とも同等であったが，肥育後期は暑熱期が適温期よりも有意に高まった．その他の TG, AST および Ca 濃度は，いずれの肥育ステージにおいても両時期間に差は認められなかった．

2.1.4 考察

暑熱期の代謝体重当たりの飼料摂取量は，適温期に比べて肥育前期は減少する傾向 ($P = 0.069$) を示したが，肥育中期になると増加 ($P < 0.05$) に転じ，そして肥育後期は再び減少した ($P < 0.05$)．乳用牛では暑熱環境による飼料摂取量の減少が報告されており (早坂ら 1988; 早坂と山岸 1990; West 2003; Tajima ら 2007)，肉用牛についても，同様に暑熱環境下での飼料摂取量の減少がみられている (Brown-Brandle ら 2005; Mader ら 2006; Arias と Mader 2011)．

本研究では肥育前期と後期は暑熱期に飼料摂取量が減少し，これまでの知見と一致した傾向であったが，肥育中期では異なる結果が得られた．肥育中期の飼料摂取量を変動させる要因の 1 つとして，VA の制限給与がある．血中 VA 濃度の低下と飼料摂取量減少には正の相関関係があることが知られている (西ら 2001; 甫立ら 2004)．本研究における肥育中期の血中 VA 濃度は，暑熱期と適温期で有意な差はなかったが両時期とも低濃度であった．このことから暑熱期の飼料摂取に影響し，他の肥育ステージとは異なる結果となった可能性が考えられる．しかし，本研究の結果からはこの推察は明確ではなく，今後さらなる研究が必要である．

一方，肥育前期，中期ともに暑熱期の代謝体重当たりの TDN 摂取量が増加しており，このことは暑熱によるエネルギー要求量の増加に応答したものと考えられる．肥育後期についても暑熱期にエネルギー要求量が増加していたものと考えられるが，肥育後期は肥育前期や中期に比べて体重当たりの体表面積が小さく熱放散が不利となることから (三村と森田 1980)，代謝体重当たりの TDN 摂取量が減少したものと考えられた．エネルギー要求量の増加は熱産生の増大につながる

ため、暑熱期の体温上昇を抑制するために、乳用牛では DM 摂取量を減らし、飼料摂取に伴う熱生産量を低下させることが報告されている（柴田と向居 1981）。加えて、濃厚飼料は粗飼料よりも発酵熱が少ないとされている（Ørskov ら 1968）。本研究では、濃厚飼料摂取割合が肥育前期および後期の暑熱期に適温期と比べて有意に増加し、肥育中期は両時期の割合は同等であった。この結果は、肥育前期および後期においては、暑熱期に飼料摂取量が減少したものの、選択的に濃厚飼料を摂取することでエネルギー利用効率を改善し、ルーメン発酵による熱生産量を減少させて体温の上昇を抑制させている可能性を示していると考えられた。

また、育成前期および後期のホルスタイン種雌牛では代謝エネルギー摂取量の低下により増体が低下することが報告されている（野中ら 2010）。本研究では、暑熱期の DG および飼料効率は、肥育前期は低下し（ $P < 0.05$ ）、肥育中期は適温期と比べて有意差は認められなかった（ $P > 0.10$ ）。肥育後期においては DG（ $P < 0.01$ ）および飼料効率（ $P < 0.05$ ）は減少した。肥育前期および後期は、暑熱によるエネルギー要求量の増加や飼料摂取量の減少により増体が停滞したと考えられたが、肥育中期は他のステージと異なる結果であったことから、暑熱への反応が異なると推察された。Oka ら（1998b）は、VA 制限が甲状腺ホルモンであるトリヨードサイロニン（ T_3 ）とインスリン様成長因子-I（IGF-I）の減少を招き、これらの生理的変化が増体と飼料効率を減少させることを報告している。本研究においても、血中 VA 濃度が低くなった肥育中期にこのような変化が生じているものと推測され、このことにより他の肥育ステージと異なる結果となった可能性が考えられた。

これらのことから、暑熱環境が飼料摂取量および飼料効率に及ぼす影響は肥育ステージによって異なることが示され、特に肥育後期でその影響が著しく、生産性を大きく低下させていることが示唆された。

肥育ステージごとの各血液成分値は、黒毛和種の肥育牛としてはほぼ正常値の範囲内であった（Kaneko 1983; 渡辺ら 2010; 乙丸ら 2015）。

暑熱環境と血液成分の関係について Shaffer ら（1981）は、気温の上昇による血液成分の増加は、より多くの水分が循環系から気化冷却へ搬送されることにより血液濃縮が生じるために起こり、血液成分の減少は、飼料摂取量の有意な減少と暑熱ストレスによる呼吸運動の著しい増加の結果であるとしている。本研究で認められた暑熱期の有意な変動としては、肥育前期は Alb, BUN, および IP 濃度と A/G 比の低下と G1b 濃度の増加、肥育中期は T-cho 濃度の減少と IP 濃度の増加、肥育後期は T-cho および BUN 濃度の減少と VA 濃度の増加がみられた。TP 濃度と暑熱環境については、G1b 濃度の減少により TP が減少するという報告（生田ら 2010）と、逆に G1b 濃度の増加により TP 濃度が増加（Shaffer ら 1981; Lee ら 1978）、さらに TP 濃度の変動は一定ではないが Alb 濃度が減少するため A/G 比が減少するという知見（Roussel ら 1972）がある。本研究では、TP 濃度はいずれの肥育ステージにおいても両時期間に差はなかったが、肥育前期の暑熱期に Alb 濃度の低下による A/G 比の減少がみられ、Roussel ら

（1972）の報告と同様の変化であった。全国の乳用牛を対象とした調査では、BUN 濃度の季節的な変動は認められていない（萩原ら 1978）が、Shaffer ら（1981）は、乳牛において暑熱期に BUN 濃度の有意な低下を報告している。本研究における血中 BUN 濃度は、肥育

前期および後期の暑熱期に適温期に比べて有意に低下していた。これは、両ステージともに代謝体重当たりの CP 摂取量は暑熱期が適温期より有意に低く、また暑熱により CP 消化率が低下していることが BUN 濃度に反映したものと考えられた。T-cho および IP 濃度の暑熱環境との関係については、乳牛において飼料摂取量の減少により低下することが知られている（生田ら 2010）。本報告では、肥育中期および後期において T-cho 濃度は暑熱期に適温期よりも低値（ $P < 0.05$ ）を示し、肥育前期も暑熱期が低い傾向にあった（ $P = 0.082$ ）。また、IP 濃度は肥育前期の暑熱期に適温期より低下（ $P < 0.05$ ）し、逆に肥育中期の暑熱期は適温期より増加（ $P < 0.05$ ）していた。肥育前期および後期については暑熱期に代謝体重当たりの飼料摂取量が減少したことを反映した結果と考えられた。肥育中期に暑熱期の IP 濃度が増加したことは、代謝体重当たりの飼料摂取量が増加したためと考えられるが、T-cho 濃度が低下した原因については不明であった。本研究では、肥育後期の暑熱期の血中 VA 濃度は適温期よりも高かった（ $P < 0.05$ ）。試験場では、肥育後期以降、定期的に VA 製剤（VA 含量 30,000 IU/mL）を 5~10mL 程度経口投与する飼養管理を行っているため、血液採取のタイミングによっては VA 製剤の給与効果による血中 VA 濃度の増加が見られると推察された。そのため、VA 濃度は暑熱の影響を単純に反映したものとは考えられず、今後さらなる検討が必要である。

以上のことから、肥育前期および後期については飼料効率および DG が適温期よりも暑熱期に低下し、血液成分は、暑熱の影響によりいくつかの成分に変動がみられた。しかし、肥育中期におけるこれらの項目については、暑熱環境との関係は明確ではなかった。これらの

ことから、暑熱環境による発育、飼料効率、および血液成分への影響は肥育ステージによって異なると結論付けられた。また、暑熱環境下における肥育後期の黒毛和種は、飼料摂取に伴い発生する熱を効率よく放熱できないために体温が上昇し、飼料摂取量の減少が顕著となりTDN摂取量も減少したと考えられた。以上のことから、肥育後期は暑熱の影響が最も顕著であると考えられた。

そこで2節では、肥育後期の黒毛和種について、暑熱期と適温期の飼料消化性の違いについて検討した。

2.1.5 要約

本節では，暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の生産性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，宮崎県畜産試験場で飼養した63頭の黒毛和種去勢肥育牛の肥育ステージごとの飼料摂取量，発育，および血液成分について暑熱環境の影響を解析した．環境時期の区分はTHIを指標に68以上を示した6～9月を暑熱期，その他の月を適温期とした．肥育ステージは，前期（10～14カ月齢），中期（～22カ月齢），および後期（～28カ月齢）の3期に分けた．

代謝体重当たりの飼料摂取量は，適温期と比べて暑熱期に肥育前期および後期に減少し，飼料効率は，肥育前期および後期に適温期と比べて暑熱期に有意に減少した．肥育中期では暑熱期の飼料摂取量は適温期よりも有意に増加したが，日増体量には暑熱の影響はなかった．血液成分は，肥育前期および後期において暑熱の影響によると考えられる変動がみられた．しかし，肥育中期では，暑熱による影響は明確ではなかった．これらのことから，暑熱環境による発育，飼料効率，および血液成分への影響は，肥育ステージによって異なることが示された．

2.1.6 図表

Table 2.1.1 The temperature, relative humidity, temperature humidity index (THI), and season category in the Miyazaki Prefecture, from 2009 to 2014

Month	Temperature (°C)			Relative humidity (%)	THI ¹	Season category
	Average	Maximum	Minimum			
Jan	6.7	21.1	-5.3	62.5	47.1	Moderate
Feb	9.4	26.1	-6.9	70.0	50.6	Moderate
Mar	11.9	29.0	-2.8	66.3	54.4	Moderate
Apr	15.5	29.3	0.9	66.7	59.7	Moderate
May	20.0	33.3	6.8	70.8	66.3	Moderate
Jun	22.8	35.4	11.6	83.0	71.5	Hot
Jul	27.0	37.7	17.7	79.3	77.9	Hot
Aug	27.6	38.1	18.9	79.3	78.9	Hot
Sept	24.6	34.6	12.0	77.7	74.0	Hot
Oct	19.8	32.3	5.8	73.8	66.4	Moderate
Nov	14.2	26.6	-0.1	73.5	57.7	Moderate
Dec	8.4	22.2	-3.8	67.3	49.2	Moderate

Calculated using the data of MLITT Japan Meteorological Bureau 2016.

¹THI = Temperature × 0.8 + [(Relative humidity/100) × (Temperature - 14.4)] + 46.4

Table 2.1.2 Composition of feed

Item	Stage of fattening			
	Early 10-14 months		Middle 15-22 months	Late 23-28 months
	Start	End	End	End
	As fed basis			
Concentrate (kg)				
Commercial formula feed ¹	1.0	6.0	9.0	8.5
Steam rolled corn	1.2	-	-	-
Wheat bran	1.5	-	-	-
Soybean meal	0.6	-	-	-
Roughage (kg)				
Alfalfa hay cube	1.0	-	-	-
Timothy hay	4.0	2.0	-	-
Rice straw	0.1	2.0	2.0	1.5

¹Early feed (Miyazaki shimofuri tokugou, Minami nihon kumiai siryo), total digestible nutrients (TDN: 73.5%), crude protein (CP: 13%) Middle feed (Miyazaki shimofuri koukiyou, Minami nihon kumiai siryo) (TDN: 73.0%, CP: 12%) Late feed (Miyazaki shimofuri tokugou shiageyou, Minami nihon kumiai siryo) (TDN: 74.0%, CP: 10.6%)

Table 2.1.3 Effects of different environmental conditions on the feed intake and growth performances of Japanese Black fattening steers at their different stages of fattening

Item	Stage of fattening									
	Early 10 – 14 months			Middle 15 – 22 months			Late 23 – 28 months			
	Hot ¹ (n = 41)	Moderate ² (n = 63)	<i>P</i> -value	Hot (n = 41)	Moderate (n = 59)	<i>P</i> -value	Hot (n = 42)	Moderate (n = 40)	<i>P</i> -value	
Feed intake										
Feed intake (g/kgBW ^{0.75} /day)	96.92 ± 1.80	99.14 ± 1.63	0.069	82.62 ± 1.89	79.68 ± 1.56	0.029	64.44 ± 1.34	67.65 ± 1.32	0.001	
TDN (g/kgBW ^{0.75} /day)	64.57 ± 1.08	62.78 ± 0.95	0.032	57.82 ± 1.25	55.51 ± 1.01	0.013	45.15 ± 0.86	56.97 ± 0.84	0.004	
CP (g/kgBW ^{0.75} /day)	12.49 ± 0.38	13.04 ± 0.34	0.042	8.39 ± 0.18	8.05 ± 0.15	0.011	6.54 ± 0.14	6.77 ± 0.14	0.008	
Concentrate ratio ³ (%)	69.8 ± 1.1	63.4 ± 1.0	<0.001	88.1 ± 0.6	88.1 ± 0.6	0.957	88.3 ± 0.7	86.7 ± 0.6	0.004	
DG (kg/day)	0.82 ± 0.03	1.02 ± 0.02	<0.001	0.80 ± 0.05	0.88 ± 0.03	0.156	0.55 ± 0.04	0.69 ± 0.04	0.009	
Feed efficiency ⁴ (g/kg)	94.8 ± 4.9	123.3 ± 3.2	<0.001	85.9 ± 5.1	89.8 ± 3.0	0.460	59.5 ± 4.1	73.4 ± 3.5	0.011	
Age (day)	407.4 ± 10.0	358.8 ± 8.9	<0.001	586.4 ± 14.1	625.6 ± 11.7	<0.001	825.1 ± 12.6	787.9 ± 12.0	<0.001	
BW (kg)	415.1 ± 7.1	358.5 ± 5.4	<0.001	525.8 ± 10.6	600.6 ± 7.7	<0.001	736.1 ± 8.7	710.3 ± 8.4	0.002	

Means ± Standard error

TDN, total digestible nutrients; CP, crude protein; DG, daily gain; BW, body weight.

¹Hot environmental condition, from June to September from 2009 to 2014

²Moderate environmental condition, from January to May and from October to December from 2009 to 2014

³The ratio of concentrate to total feed intake

⁴DG/feed intake

Table 2.1.4 Effects of different environmental conditions on the blood profile of Japanese Black fattening steers at their different stages of fattening

Item	Stage of fattening								
	Early 10–14 months			Middle 15–22 months			Late 23–28 months		
	Hot (n = 37)	Moderate (n = 45)	<i>P</i> -value	Hot (n = 10)	Moderate (n = 59)	<i>P</i> -value	Hot (n = 42)	Moderate (n = 40)	<i>P</i> -value
TP (g/dL)	6.7 ± 0.1	6.7 ± 0.0	0.540	6.9 ± 0.1	7.0 ± 0.1	0.357	7.0 ± 0.1	7.0 ± 0.1	0.785
Alb (g/dL)	3.50 ± 0.04	3.65 ± 0.04	< 0.001	3.51 ± 0.08	3.53 ± 0.03	0.810	3.51 ± 0.03	3.45 ± 0.04	0.112
Glb (g/dL)	3.21 ± 0.07	3.03 ± 0.06	0.010	3.36 ± 0.12	3.43 ± 0.05	0.574	3.49 ± 0.08	3.57 ± 0.08	0.333
A/G ratio	1.11 ± 0.03	1.21 ± 0.02	< 0.001	1.07 ± 0.05	1.04 ± 0.02	0.589	1.03 ± 0.02	0.99 ± 0.03	0.169
T-cho (mg/dL)	125.5 ± 3.2	131.8 ± 2.8	0.082	122.3 ± 9.3	154.0 ± 3.6	0.002	139.1 ± 4.5	150.3 ± 4.5	0.002
BUN (mg/dL)	13.9 ± 0.8	18.4 ± 0.7	< 0.001	12.8 ± 1.1	14.2 ± 0.4	0.183	14.2 ± 0.5	15.2 ± 0.5	0.008
TG (mg/dL)	9.7 ± 0.6	10.6 ± 0.6	0.142	9.7 ± 1.6	12.0 ± 0.8	0.140	12.9 ± 0.6	12.3 ± 0.6	0.346
IP (mg/dL)	7.7 ± 0.1	8.1 ± 0.1	< 0.001	7.7 ± 0.2	7.1 ± 0.1	0.021	7.1 ± 0.1	7.1 ± 0.1	0.644
AST (U/L)	66.9 ± 5.0	68.2 ± 4.2	0.834	75.5 ± 8.4	78.5 ± 3.2	0.728	74.9 ± 4.0	73.7 ± 4.0	0.809
Ca (mg/dL)	10.1 ± 0.1	10.1 ± 0.1	0.283	9.7 ± 0.1	9.7 ± 0.0	0.832	9.5 ± 0.0	9.6 ± 0.0	0.416
VA (IU/dL)	94.9 ± 4.1	96.2 ± 3.6	0.761	45.8 ± 7.4	58.4 ± 2.7	0.103	52.4 ± 3.4	43.9 ± 3.4	0.010

Means ± Standard error

Hot, Moderate; See the footnotes in Table 2.1.3

TP, total protein; Alb, albumin; Glb, globulin; A/G, albumin/globulin; T-cho, total cholesterol; BUN, blood urea nitrogen; TG, triglycerides; IP, inorganic phosphorus; AST, aspartate amino transaminase; Ca, Calcium; VA, vitamin A.

2 節 飼料消化性および第一胃液性状への影響

2.2.1 目的

1 節では，暑熱環境が黒毛和種肥育牛の飼料摂取量，発育，および血液成分に及ぼす影響を検討した．その結果，暑熱が黒毛和種肥育牛の飼養成績に及ぼす影響は肥育ステージによって異なることが明らかになった．具体的には，肥育前期および後期では暑熱の影響により飼料摂取量，DG，および飼料効率が低下することが示され，一部の血液成分について暑熱による影響とみられる変動が認められた．特に，肥育後期では暑熱期に TDN 摂取量の減少も認められ，肥育後期は他の肥育ステージに比べて暑熱による生産性への影響は大きいと考えられた．しかし肥育中期では，暑熱による飼料摂取量，発育，および血液成分への影響は明確ではなかった．このことは，肥育中期における VA 給与の制限が関連しているものと推察された．このような暑熱による飼養成績の変動には，暑熱環境が黒毛和種肥育牛の飼料消化性に影響を及ぼしていることが関連している可能性が考えられる．

これまでに，暑熱環境下における反芻家畜の飼料消化性は，第一胃の運動が低下することで消化管内での飼料片滞留時間が延長し，飼料消化率が高まることが報告されている（Warren ら 1974; 平山ら 2002）．一方で，混合飼料を給与すると，夏季は冬季と比べて繊維成分の消化率が低下するといった知見（早坂ら 1988）もある．また，黒肥地ら（1967）は，褐毛和種において濃厚飼料多給与時の夏と冬の飼料消化性の違いについて検討しており，飼料消化率は冬より夏で低いことを認めている．これらのことから，暑熱環境が反芻家畜の飼料消化率に影響を及ぼすことは明らかであり，黒毛和種肥育牛の飼料消化率にも何らかの影響を及ぼしているものと推察されるが，このこと

に関する知見は見当たらない。

そこで本節では，1 節において暑熱の影響が顕著であった肥育後期の黒毛和種肥育牛の暑熱期と適温期における飼料消化率と第一胃液性状を比較し，暑熱が飼料消化性に及ぼす影響について検討した。

2.2.2 材料および方法

1) 供試牛および消化試験の方法

供試牛は、肥育後期の黒毛和種去勢牛を 2013 年に 3 頭、および 2014 年に 5 頭とした。そして、第 2 章 1 節の区分に準じて、暑熱期（2013 年 8 月と 2014 年 7 月）と適温期（2013 年 11 月と 2014 年 5 月）に消化試験を実施した。消化試験時の平均月齢および平均体重は、暑熱期で 27.5 ヶ月齢および 727.4 kg、適温期で 28.1 ヶ月齢および 739.9 kg であった。気温および湿度は、牛舎内に設置した温湿度データロガー（EL-USB-2; 株式会社エムケー・サイエンティフィック, 神奈川, 日本）を用いて測定した。試験期間中の平均気温, 平均湿度, および平均 THI を Table 2.2.1 に示した。

飼料消化率は、予備期 8 日間および本期 5 日間とする酸化チタンを用いたインデックス法（Ohmori ら 2013）により評価した。本期中の 5 日間に、9:00 と 16:00 の 1 日 2 回、直腸より糞を採取した。採取した糞は 4°C で冷蔵保存し、試験終了後に供試牛ごとに各試験日の糞を同量ずつ混合し、分析サンプルとした。Table 2.2.2 に給与飼料の成分について示した。飼料は、濃厚飼料を 9:00 と 16:00 に 1 日 2 回（8.5 kg/日）給与し、稲わらを飽食給与した。なお、供試牛は単房で飼養し、鉱塩および水は自由摂取とした。第一胃液は、消化試験の本期最終日における 9:00 の飼料給与 4 時間後（13:00）にルミナー胃液採取器（NFM90, 富士平工業株式会社, 東京, 日本）を用いて約 500 ml 採取した。採取した第一胃液は、4 重ガーゼで濾過後、濾液の一部を VFA 濃度およびアンモニア態窒素（NH₃-N）濃度の測定まで -30°C で凍結保存した。

動物の飼育および動物を使用した実験については、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のガイドラインに従って実施した。

2) 試料の分析方法

給与飼料および糞の DM, EE, および CA 含量は常法（自給飼料利用研究会 2009）により測定し, CP はケルダール法, 耐熱性 α -アミラーゼ処理 NDF (aNDFom) 含量は AOAC (2005) の方法, そしてデンプン含量は総デンプン測定キット (TOTAL STARCH ASSAY KIT, Megazyme, Wicklow, Ireland) で定量した。OM 含量は DM 含量から CA 含量を差し引いて求め, NFC 含量は, DM 含量から CP, EE, CA および aNDFom 含量を差し引いて求めた。糞中の酸化チタンは Ohmori ら (2013) の方法で測定した。第一胃液性状は, 凍結した胃液を融解して遠心分離 (1500×g, 10 min) 後, その上清を用いて, VFA 濃度を高速液体クロマトグラフ (CLASS-LC10, 島津製作所株式会社, 東京) による BTB ポストラベル法 (カラム: Shodex Rspak (KC-811, 昭和電工株式会社, 東京), カラム温度: 60°C, 移動相: 3 mmol 過塩素酸溶液, 流量: 0.7 ml/分, および検出波長: 455 nm) により測定し, NH₃-N は, 水蒸気蒸留法 (自給飼料利用研究会 2009) で測定した。

3) 統計処理

データの解析処理は, SAS MIXED プロシジャを用いて以下のモデルで行った (JMP[®] 12; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)。

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_k + e_{ijk}$$

Y_{ijk} : 測定値 ijk

μ : 総平均

α_i : 年次 i の効果

β_{ij} : 年次 i における個体 j の効果

γ_k : 処理（暑熱期、適温期） k の効果

e_{ijkl} : 誤差 $ijkl$

なお，年次と個体は変量模型として取り扱った．また，F 検定により，危険率 5%未満の場合を有意差があるものとした．

2.2.3 結果

消化試験における飼料摂取量および飼料消化率を Table 2.2.3 に示した。1日当たりの DM 摂取量は、適温期よりも暑熱期に減少した ($P < 0.05$)。そのため、CP, EE, OM, および TDN の摂取量も適温期と比べて暑熱期に有意に低下した。NFC およびデンプンの摂取量は両時期とも同程度であった。DM 摂取量に占める濃厚飼料の割合は、暑熱期が適温期よりも高まった ($P < 0.05$)。DM, CP, EE, および aNDFom の各消化率は適温期よりも暑熱期で顕著に低下し ($P < 0.05$)、OM 消化率も同様の傾向を示した ($P = 0.072$)。NFC およびデンプンの消化率は、両時期間で差はなかった。また、TDN 割合は暑熱期が適温期よりも低い傾向 ($P = 0.098$) を示し、可消化粗タンパク質 (DCP) は適温期よりも暑熱期で低値を示した ($P < 0.05$)。

暑熱期および適温期の第一胃液性状を Table 2.2.4 に示した。総 VFA 含量は、両時期で違いは認められなかった。各 VFA のモル比率は、適温期に比べて暑熱期の酪酸割合が有意に減少し、酢酸割合は増加する傾向 ($P = 0.086$) を示した。プロピオン酸割合、酢酸/プロピオン酸 (A/P) 比、および $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度には暑熱期と適温期に有意差は認められなかった。

2.2.4 考察

暑熱期の DM 摂取量は適温期よりも有意に減少し、DM 摂取量に占める濃厚飼料の割合は適温期に比べて暑熱期に有意に高まった。このことは、第 2 章 1 節の結果と一致していた。そして、飼料中 DM, CP, EE, および aNDFom の各消化率は、適温期に比べて暑熱期で有意に減少した。暑熱環境が反芻家畜の飼料消化率に及ぼす影響については、いくつか報告がある。乾草を給与した暑熱環境下の雑種雄ヤギは、CP および NDF の消化率が増加し（平山ら 2000）、同じく乾草を給与した 32°C の気温下におけるホルスタイン種去勢牛は 18°C の気温下に比べて、NDF, 酸性デタージェント繊維 (ADF), およびセルロースの消化率が増加する（Warren ら 1974）。このように粗飼料多給における暑熱環境下では飼料成分消化率が増加する報告があり、Warren ら（1974）はその原因を消化管内滞留時間の増加によるものと報告している。一方で、混合飼料（粗飼料割合 55%）を給与した夏季の高泌乳牛は、冬季と比べて CP の消化率は増加するが ADF 等の繊維成分の消化率が低下するといった知見も報告されている（早坂ら 1988）。褐毛和種の肥育では、粗濃比 4:6~3:7 の飼料を給与した場合、夏季は冬季に比べて OM, 粗繊維, および EE の消化率が低下しており（黒肥地ら 1967）、本研究の結果と一致している。早坂ら（1988）は、高養分含量の飼料を給与した場合の消化率の検討については、消化管内滞留時間といった物理的要因よりも第一胃内発酵相といった代謝的要因との関連でとらえる必要があると述べている。これらの知見から、給与飼料の粗濃比および飼料構成などが暑熱条件下における飼料消化率に影響することが推察できる。本研究における濃厚飼料摂取割合は、暑熱期および適温期ともに 80% を超えており、同割

合は適温期に比べて暑熱期では約 3%増加 ($P < 0.05$) していた. 大谷ら (2001) は, 飼料中のデンプン含量の増加により EE および NDF 消化率の低下を報告している. また, 黒肥地ら (1967) は, 冬季に比べて夏季の OM および粗繊維消化率の顕著な低下は, 炭水化物の多量摂取によるデンプン減退の作用であるとし, 低温時よりも高温時にその作用が著しくなることを指摘している. これらのことから, 暑熱環境における黒毛和種肥育牛の飼料消化率低下は, 濃厚飼料多給によってもたらされていることが示唆された.

本研究では, 第一胃液中の総 VFA 含量は両時期間に差はなかったものの, 暑熱期において適温期よりも酢酸割合が高い傾向 ($P = 0.086$) にあり酪酸割合が低い ($P < 0.01$) 結果が得られた. Kelly ら (1966) は, フィステルを装着したホルスタイン種乾乳牛を用いて, 暑熱条件と適温条件で同じ飼料を同じ量摂取させた場合, 暑熱条件下において総 VFA 濃度の減少, VFA モル比率では酢酸割合の増加と酪酸のわずかな減少を報告しており, 本研究の結果とほぼ一致するものであった. また, 暑熱の影響による第一胃内細菌叢の変化が VFA モル比率を変化させることが分かっている (Tajima ら 2007). さらに, Nelson ら (1968) は, 易発酵性炭水化物の摂取により胃液 pH が低下して繊維分解菌の活動が低下するなど, 第一胃内細菌叢が変化することを示している. これらのことから, 暑熱環境下の黒毛和種肥育牛の第一胃内発酵は, 暑熱と濃厚飼料摂取割合の増加の影響によりルーメン内の細菌叢が変化し, VFA 組成が変動すると考えられた.

以上より, 肥育後期の黒毛和種肥育牛は, 暑熱の影響により飼料消化率が低下することが明らかとなり, その原因は濃厚飼料の多給による第一胃内発酵への影響と関連していることが示唆された.

本章では1節および2節の結果より、黒毛和種肥育牛に対する暑熱の影響の存在は明らかであるものの、その度合いは摂取量と消化率の低下によって左右され、給与飼料や肥育ステージによって異なっていることが示された。そのため、生産性の低下を防止するためには、それぞれの時期における適切な暑熱対策を検討すべきであると考えられた。また、肥育後期は暑熱の影響により飼料消化性が減少し、それにより飼料効率が低下していることが明らかになった。

そこで、第3章および第4章では肥育後期の暑熱期に重点を置き、栄養管理による暑熱対策が肥育牛の飼料消化性に及ぼす効果を中心に検討した。

2.2.5 要約

本節では、暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼料消化性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、肥育後期の黒毛和種去勢肥育牛 8 頭を用いて暑熱期と適温期の飼料消化性および第一胃液性状について比較検討した。その結果、DM 摂取量は適温期よりも暑熱期に減少し、DM 摂取量に占める濃厚飼料の割合は適温期に比べて暑熱期に高まった。このことは、第 2 章 1 節の結果と一致するものであった。また、DM、CP、EE、および aNDFom の各消化率は適温期よりも暑熱期に顕著に低下した。そのため、TDN 割合は暑熱期に適温期よりも低い傾向を示し、DCP は適温期よりも暑熱期で有意に低下した。第一胃液の総 VFA 含量および A/P 比に暑熱による影響は認められなかった。しかし、VFA モル比率では、適温期と比べて暑熱期に、酢酸割合の増加と酪酸割合の減少が認められた。

これらのことから、肥育後期の黒毛和種去勢肥育牛は暑熱の影響により飼料消化率が低下することが明らかとなり、そのことは、濃厚飼料多給による第一胃内発酵への影響と関連することが示唆された。

2.2.6 図表

Table 2.2.1 Environmental conditions during the hot and moderate seasons

Item	Hot ¹	Moderate ²
Temperature (°C)	27.7	17.1
Relative humidity (%)	84.7	73.6
THI	79.8	61.7

¹Hot environmental condition, 19–24/Aug. /2013 and 14–19/Jul./2014

²Moderate environmental condition, 11–16/Nov. /2013 and 26–31/May/2014

Table 2.2.2 Chemical composition of feed during the hot and moderate seasons

Item	Rice straw		Commercial formula feed ¹	
	Hot	Moderate	Hot	Moderate
DM (%)	88.7	90.4	88.2	89.7
OM (% of DM)	80.1	81.1	97.1	96.5
CP (% of DM)	3.2	3.8	12.9	13.8
EE (% of DM)	1.5	1.4	2.8	2.8
aNDFom (% of DM)	70.7	68.5	30.2	32.5
Starch (% of DM)	3.7	4.4	48.8	47.5

Hot, Moderate; See the footnotes in Table 2.2.1

DM, dry matter; OM, organic matter; CP, crude protein; EE, ether extract; aNDFom, α -Amilase treated ash-free neutral detergent fiber.

¹Miyazaki shimofuri tokugou shiageyou, Minami nihon kumiai siryo.

Table 2.2.3 Effects of different environmental conditions on the nutrient intake and feed digestibility of Japanese Black fattening steers

Item	Hot (n = 8)	Moderate (n = 8)	SE	P-value
BW (kg)	734.7	733.3	14.5	0.923
Nutrient intake (kg/day)				
DM	8.42	8.85	0.17	0.028
OM	7.99	8.32	0.16	0.047
CP	0.96	1.07	0.04	0.002
EE	0.22	0.23	0.01	0.007
aNDFom	2.90	3.33	0.15	0.027
NFC	3.89	3.70	0.11	0.272
Starch	3.63	3.60	0.05	0.455
Concentrate ratio ¹ (%)	87.5	84.5	0.9	0.039
Digestibility (%)				
DM	64.0	68.9	6.8	0.048
OM	67.8	71.9	6.4	0.072
CP	51.4	60.3	8.6	0.032
EE	54.3	69.6	4.4	0.004
aNDFom	48.8	59.4	10.3	0.011
NFC	86.8	87.3	1.4	0.781
Starch	89.9	89.3	3.1	0.862
TDN (% of DM)	66.1	69.8	6.0	0.098
DCP (% of DM)	5.8	7.3	0.8	< 0.001

Hot, Moderate; See the footnotes in Table 2.2.1

SE, Standard error; BW, body weight; DM, dry matter; OM, organic matter; CP, crude protein; EE, ether extract; aNDFom, α -Amylase treated ash-free neutral detergent fiber; NFC, non-fibrous carbohydrate; TDN, total digestible nutrients; DCP, digestible crude protein.

¹The ratio of concentrate to total DM intake.

Table 2.2.4 Effects of different environmental conditions on Japanese Black fattening steer rumen volatile fatty acid (VFA) and ammonia-nitrogen concentrations

Item	Hot (n = 8)	Moderate (n = 8)	SE	<i>P</i> -value
Total VFA (mmol/L)	75.8	72.4	7.1	0.706
Composition (%)				
Acetic acid	60.4	56.3	5.3	0.086
Propionic acid	25.3	23.7	3.4	0.581
Butyric acid	12.9	17.5	1.5	0.006
Acetic : Propionic ratio	2.6	2.6	0.5	0.837
ammonia-nitrogen (mg/dL)	3.1	2.6	0.6	0.572

Hot, Moderate; See the footnotes in Table 2.2.1

SE, Standard error; VFA, Volatile fatty acid.

第3章 飼料の制限給与が黒毛和種去勢肥育牛の飼料摂取量，発育， 枝肉成績，および飼料消化性に及ぼす影響

緒言

暑熱環境が家畜の生産性に影響を及ぼすことは，従来から報告されている（De Rensis と Scaramuzzi 2003; West 2003; Brown-Brandle ら 2005; Mader ら 2006; Arias と Mader 2011）．しかし，黒毛和種肥育牛についての知見は見当たらないため，第2章では暑熱環境が黒毛和種去勢肥育牛の飼養成績と飼料消化性に及ぼす影響を検討した．その結果，暑熱が黒毛和種肥育牛の飼養成績に及ぼす影響は肥育ステージによって異なることが明らかになった．また，肥育後期の黒毛和種肥育牛は，濃厚飼料多給による第一胃内発酵への影響により，暑熱期には適温期よりも飼料消化率が低下することが示された．したがって，肥育後期の黒毛和種肥育牛では，暑熱期の飼料消化性を改善することが生産性の改善につながることを示唆された．そこで本章では，肥育後期の暑熱期における飼料消化性低下を抑制する対策として飼料の制限給与を検討した．

制限給与とは，飼料の給与量や給与するエネルギーの量を通常の飼養に比べて減らす飼養管理である．これまでに，飼料の制限給与はフィードロットの交雑種において暑熱対策としての有用性が確認されている（Mader ら 2002; Davis ら 2003; Mader と Davis 2004）．制限給与の暑熱対策としての効果は，代謝を支える臓器のサイズが減少すること（Murphy と Loerch 1994）や代謝促進に関連する血中 T_3 濃度が減少すること（Pethes ら 1985; Murphy と Loerch 1994）により維持エネルギーが減少することと関連することが示されている．また適温環境においては，制限給与による DM 摂取量の減少が飼料消化率を増

加させることが示されている (Murphy と Loerch 1994). したがって飼料の制限給与は, 黒毛和種肥育牛の暑熱期における生産性の維持に対して有効と考えられる. しかし, 黒毛和種肥育牛への制限給与に関しては, 肉質や産肉性に及ぼす影響についての報告があるものの (村元ら 2002; 坂下ら 2004), 暑熱時期の飼養成績や飼料消化率へ及ぼす影響については報告がない.

そこで本章では, 1 節において飼料の制限給与が暑熱期の黒毛和種去勢肥育牛の飼料消化性および第一胃液性状に及ぼす影響を検討し, 2 節において, 発育, 飼料摂取量, および枝肉成績に及ぼす影響について検討した.

1 節 暑熱期の飼料消化性および第一胃液性状への影響

3.1.1 目的

肉用牛の肥育では，濃厚飼料を飽食給与する飼養が一般的である．しかしながら，濃厚飼料を多給する飼養は暑熱対策をより複雑にすることが指摘されている（Mader ら 2002）．それは，濃厚飼料といった高エネルギー飼料の給与が代謝熱負荷を増加させ（Gaughan ら 1996），暑熱時期の体温上昇につながるためである（Brosh ら 1998）．一方で，牛への飼料の制限給与は熱産生量を減少させることから（Purwanto ら 1990），暑熱対策としての有用性がいくつか報告されている．

制限給与とは，飼料給与量や給与するエネルギー量を通常の飼養に比べて減らす飼養管理のことを指す．Davis ら（2003）は，フィードロットの雄牛を用いて暑熱期に制限給与を実施したところ，直腸温度の低下を確認している．また，交雑種に対して暑熱時期に入る前から飼料給与量を制限すると，生体からの熱増加と外環境からの暑熱の影響が軽減され，暑熱時期の飼料摂取量の減少が抑制されることが明らかにされている（Mader ら 2002; Mader と Davis 2004）．加えて，適温環境下においては，肉用牛への制限給与による DM 摂取量の減少は，飼料消化率の向上をもたらすことが報告されている（Murphy と Loerch 1994）．これらのことから，黒毛和種肥育牛への飼料の制限給与は，暑熱期において生産性を低減させることなく，飼料消化率低下を抑制できる可能性がある．しかしながら，黒毛和種肥育牛への制限給与に関する既往の知見は，枝肉の品質に及ぼす影響に関する報告（村元ら 2002; 坂下ら 2004）がほとんどであり，暑熱の影響に対する効果については検討されていない．

そこで本節では，黒毛和種去勢肥育牛への飼料の制限給与が肥育後

期の暑熱期における飼料消化性，第一胃液性状，および血液成分に及ぼす影響について検討した。

3.1.2 材料および方法

1) 供試牛と飼養管理

供試牛は 14 カ月齢の黒毛和種去勢牛 8 頭とし，29 カ月齢までの 15 カ月間を試験期間とした．肥育期間の区分は，第 2 章 1 節と同様である．処理区は，飼料給与量を一定量に制限する（制限）区と，飽食給与する（飽食）区の 2 区を設定して，それぞれに 4 頭ずつ配置した．飼料給与量は，制限区は 2 週間ごとに測定した体重をもとに日本飼養標準・肉用牛（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）における DG0.75 kg に必要な TDN 要求量の 110%となるように制限し，給与飼料の粗濃比は 1:9 とした．また，飽食区は 1 週間ごとに給与量を調節した．

濃厚飼料は市販の肥育仕上げ用配合飼料を，粗飼料は稲わらを用いた．飼料給与の方法および飼養管理は，第 2 章 1 節と同様とした．

なお，試験開始前の肥育前期は，全頭とも第 2 章 1 節の飼養管理に準じた．

動物の飼育および動物を使用した実験については，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のガイドラインに従って実施した．

2) 消化試験

消化試験（Fig. 3.1.1）の実施時期は，第 2 章 2 節の区分に準じ，適温期の 5 月と暑熱期の 7 月とした．試験時の供試牛の月齢および体重は，それぞれ，適温期で 24 カ月齢および 693 kg，暑熱期で 26 カ月齢および 767 kg である．なお，いずれの時期も供試牛は肥育後期に該当する．Table 3.1.1 に消化試験時の給与飼料の成分を示した．

飼料消化率および窒素出納は，予備期 7 日間，本期 3 日間とする全糞全尿採取法により算出した．本期に採取した糞および尿は，4°C で保存し，供試牛ごとに各採取日の糞および尿をそれぞれ混合して分析サンプルとした．第一胃液および血液の採取は，第 2 章 2 節と同様である．

3) 試料分析

給与飼料および糞の DM, OM, CP, EE, aNDFom, およびデンプン，第一胃液の VFA 濃度，ならびに各血漿成分濃度の分析方法は第 2 章 2 節と同様である．尿中の窒素含量はケルダール法により測定した（自給飼料利用研究会 2009）．第一胃液の NH₃-N 濃度はアンモニアキット（アンモニア-テストワコー；和光純薬工業株式会社，大阪，日本）を用いて定量した．

4) 統計処理

データの解析処理は，SAS MIXED プロシジャを用いて行った（JMP[®] 12; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA）．

消化試験時における飼料摂取量，飼料消化率，窒素出納，第一胃液性状，および血液性状は以下の混合モデルで解析した．

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_k + \alpha \times \gamma_{jk} + e_{ijk}$$

Y_{ijk} : 測定値 $_{ijk}$

μ : 総平均

α_i : 処理 $_i$ の効果

β_{ij} : 処理 $_i$ における個体 $_j$ の効果

γ_k : 時期（適温期，暑熱期） $_k$ の効果

$\alpha \times \gamma_{ik}$: 処理 i と時期（適温期，暑熱期） k の交互作用

e_{ijkl} : 誤差 ijk

混合モデルでは，処理における個体の効果は変量模型として取り扱った．また，F検定により，危険率 5%未満の場合を有意差があるものとした．全ての区間の差については Tukey 法で多重比較を行った．飼料消化率および窒素利用率では，処理と時期の交互作用に傾向 ($P < 0.10$) が認められた項目について，対比により処理区ごとに消化試験の時期の差を解析した．

3.1.3 結果

Table 3.1.2 に適温期および暑熱期における代謝体重当たりの飼料摂取量と飼料消化率を示した。代謝体重当たりの DM 摂取量および成分摂取量には，制限給与による影響は認められなかった。しかし，DM，OM，および CP 消化率は，制限区と飽食区とで暑熱による影響が異なっていた。すなわち，制限区における暑熱期の DM および OM 消化率は適温期よりも高まった ($P < 0.05$) が，飽食区では両時期に有意な差は認められなかった。CP 消化率については，制限区では両時期に差は認められなかったが，飽食区では暑熱期に適温期より減少した ($P < 0.05$)。

窒素利用性を Table 3.1.3 に示した。制限区では暑熱期と適温期の糞中窒素および蓄積窒素割合は同等であったが，飽食区では暑熱期に糞中窒素割合が有意に増加したため，蓄積窒素割合が減少した ($P < 0.05$)。

Table 3.1.4 に，第一胃液性状を示した。総 VFA 濃度，VFA モル比，および A/P 比は，制限給与や暑熱環境による影響は認められなかった。NH₃-N 濃度は，制限区では両時期に差はみられなかったが，飽食区では暑熱期に適温期と比べて高くなった ($P < 0.05$)。

血液成分を Table 3.1.5 に示した。血漿中 TP および VA 濃度は，制限区と飽食区とで暑熱による影響が異なっていた。制限区の血漿中 TP 濃度に暑熱の影響は認められなかったが，飽食区では暑熱期に増加した ($P < 0.05$)。血漿中 VA 濃度は，飽食区では暑熱の影響は認められなかったが，制限区では適温期と比べて暑熱期に減少した ($P < 0.05$)。その他の分析項目には，処理区間に違いは認められなかった。

3.1.4 考察

本研究では飽食区と制限区の DM 摂取量に差は認められなかったが、制限区では暑熱による CP 消化率の低下や蓄積窒素割合の減少が抑制されていた。制限給与が黒毛和種去勢肥育牛の暑熱期における飼料消化性に及ぼす影響に関する既往の知見はない。しかし、肉用牛への制限給与は、代謝に関連する臓器のサイズダウンを誘導する (Murphy と Loerch 1994) ことや、血中 T_3 濃度が減少する (Pethes ら 1985; Murphy と Loerch 1994) ことから、維持エネルギーが減少する。そして制限給与による維持エネルギーの減少は、暑熱対策に有効であることが明らかにされている (Mader ら 2002; Davis ら 2003; Mader と Davis 2004)。本試験では維持エネルギーを評価していないが、制限給与による暑熱の影響緩和の効果が、飼料消化率低下を抑制したものと考えられた。しかしながら、その機序については本試験の結果からは不明であった。

両区の第一胃液性状における、総 VFA 含量、VFA モル比率、および A/P 比に制限給与や暑熱の影響は認められなかった。しかし、 NH_3-N 濃度は、飽食区では暑熱期に増加したのに対し、制限区では暑熱による影響は認められなかった。従来、暑熱環境下では第一胃内細菌のタンパク質合成能が低下するため、 NH_3-N 濃度が高まることが知られている (板橋 1996)。このことから、制限区では暑熱によるアンモニア同化速度の低下が緩和され、暑熱期の蓄積窒素の低下抑制につながったと考えられた。

血液成分は、制限区の血漿中 TP 濃度に暑熱の影響は認められなかったが、飽食区の血漿中 TP 濃度は暑熱期に増加した ($P < 0.05$)。飽食区の Alb 濃度に暑熱による変化がなかったことから、同区の A/G

比は暑熱期に減少する傾向を示した ($P < 0.10$)。つまり、飽食区の暑熱期における血漿中 TP 濃度の増加は、血漿中 G1b 濃度の増加によるものである。暑熱が血漿中 TP, Alb, および G1b 濃度に及ぼす影響については、結果が一致していない (Roubicek と Ray 1972; Roussel ら 1972; Shaffer ら 1981; 生田ら 2010)。本研究の飽食区における血漿中 G1b 濃度の増加は、Roussel ら (1972) の報告と同様であった。しかし、制限区では血漿中 TP と Alb 濃度、ならびに A/G 比に暑熱の影響は認められなかった。 α_2 -グロブリンは、暑熱や寒冷による温度ストレスに反応して増加する (Kaneko 1983)。このことから、飽食区では暑熱のストレスに対して血漿中 G1b 濃度が増加したと考えられた。一方制限区では、代謝に対する暑熱の影響が緩和されて、G1b 濃度の変化が少なかった可能性がある。制限区の血漿中 VA 濃度は、適温期と比べて暑熱期に有意に低下した。制限区においてのみ血漿中 VA 濃度が低下した要因は不明であった。しかしながら、両区の VA 濃度は暑熱期、適温期ともに欠乏状態とされる 30 IU/dl 以下 (独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009) よりも十分に高いレベルであった。

フィードロットの交雑種へ暑熱期の 82 日間制限給与を実施すると、24 日から 82 日の間の飼料効率は、飽食に比べて有意に増加した (Mader と Davis 2004)。同じく、フィードロットの交雑種では、暑熱時期に入る前からの制限給与が、外環境からの暑熱負荷と代謝熱負荷を低減する有効な方法であることが確認されている (Mader ら 2002)。本試験では、肥育中期以降から出荷までの 15 カ月間に渡って制限給与を実施したが、暑熱期に入る前から暑熱期が終了するまでの短期間の制限給与でも効果が得られる可能性が考えられる。ただ

し、本試験における制限レベルでは、肥育後期では DM 摂取量に制限給与の影響が認められず、飽食とほぼ同等であった。そのため、肥育後期の暑熱期から制限給与を開始する場合の制限レベルについては、新たに検討する必要がある。また、本試験では肥育中期の暑熱期における制限給与が飼料消化性に及ぼす影響については検討していないため、今後の課題である。

以上のことから、肥育中期から後期にかけての飼料給与量を DG0.75 kg に必要な TDN 要求量の 110% で制限給与すると、肥育後期の暑熱期では、CP 消化率の低下が抑制され、窒素利用性が向上することが示された。

3.1.5 要約

本節は、飼料の制限給与が暑熱期の黒毛和種肥育後期牛の飼料消化性に及ぼす影響について、暑熱期と適温期で比較検討した。その結果、DM および OM 消化率は制限給与により暑熱期に増加した。そして、制限区では暑熱による CP 消化率の低下と蓄積窒素割合の減少が抑制された。これらのことから、肥育中期以降の飼料の制限給与は、肥育後期の暑熱期における飼料消化率、特に CP 消化率を改善し、窒素利用性の低下を防ぐことが明らかとなった。

3.1.6 図表



Fig. 3.1.1 Data collection area.

Table 3.1.1 Chemical composition of feed during the moderate and hot in experimental period

Item	Rice straw		Commercial formula feed ¹	
	Moderate ²	Hot ³	Moderate	Hot
DM (%)	79.9	87.1	82.9	85.4
OM (% of DM)	81.5	80.4	95.8	97.1
CP (% of DM)	3.9	3.6	15.5	14.2
EE (% of DM)	1.6	1.7	3.6	2.8
aNDFom (% of DM)	60.9	62.3	22.3	30.7
Starch (% of DM)	3.9	3.8	44.7	49.0

DM, dry matter; OM, organic matter; CP, crude protein; EE, ether extract; aNDFom, α -Amilas- treated ash-free neutral detergent fiber.

¹Miyazaki shimofuri tokugou shiageyou, Minami nihon kumiai siryo.

²Moderate environmental condition, from May 12 to Jun 5, 2015.

³Hot environmental condition, from Jul 28 to Aug 21, 2015.

Table 3.1.2 Effects of restricted feeding or different environmental conditions on nutrient intake and feed digestibility of Japanese Black fattening steers

Item	Control group		Restricted group		SE	<i>P</i> -value		
	(n = 4)		(n = 4)			Treatment	Season	Treatment × season
	Moderate	Hot	Moderate	Hot				
Nutrient intake (g/kgBW ^{0.75} /day)								
DM	61.40	58.53	60.63	59.80	1.87	0.921	0.144	0.388
CP	8.83 ^{ab}	7.80 ^{cd}	8.85 ^{ad}	8.08 ^{bc}	0.25	0.656	0.001	0.400
TDN	49.58	47.00	48.53	49.50	1.53	0.720	0.449	0.123
Concentrate ratio ¹ (%)	91.1	92.1	92.3	93.4	1.2	0.422	0.235	0.968
Digestibility (%)								
DM ^B	80.0	79.1	79.2	81.9	1.0	0.441	0.297	0.054
OM ^B	82.0	81.4	81.0	83.7	1.0	0.590	0.183	0.057
CP ^A	76.5	73.1	76.0	76.0	1.2	0.426	0.089	0.083
EE	79.4 ^a	70.7 ^b	79.5 ^{ab}	74.2 ^{ab}	2.5	0.581	0.006	0.347
aNDFom	70.4 ^b	73.6 ^{ab}	70.3 ^b	77.2 ^a	1.3	0.305	0.004	0.138
Starch	97.6	97.0	96.2	97.5	0.7	0.651	0.591	0.148

Moderate, Hot; See the footnotes in Table 3.1.1

SE, Standard error; BW, body weight; DM, dry matter; CP, crude protein; TDN, total digestible nutrients; OM, organic matter; EE, ether extract; aNDFom, α -Amilase-treated ash-free neutral detergent fiber.

¹The ratio of concentrate to DM intake

^Acontrast; Moderate vs Hot of control group ($P < 0.05$).

^Bcontrast; Moderate vs Hot of restricted group ($P < 0.05$).

^{a,b,c,d}Means within a row with different superscript letters differ ($P < 0.05$).

Table 3.1.3 Effects of restricted feeding or different environmental conditions on nitrogen balance of Japanese Black fattening steers

Item	Control group		Restricted group		SE	<i>P</i> -value		
	(n = 4)		(n = 4)			Treatment	Season	Treatment × season
	Moderate	Hot	Moderate	Hot				
Ratio of nitrogen intake (%)								
Feces N excretion ^A	23.5	26.9	24.0	24.0	1.2	0.426	0.089	0.083
Urine N excretion	30.8	32.8	30.0	30.3	3.2	0.730	0.117	0.249
N retention ^A	45.7 ^a	40.3 ^b	46.0 ^{ab}	45.7 ^{ab}	3.3	0.545	0.035	0.053

Moderate, Hot; See the footnotes in Table 3.1.1

SE, Standard error.

^Acontrast; Moderate vs Hot of control group ($P < 0.05$).

^{a,b}Means within a row with different superscript letters differ ($P < 0.05$).

Table 3.1.4 Effects of restricted feeding or different environmental conditions on ruminal profiles of Japanese Black fattening steers

Item	Control group		Restricted group		SE	<i>P</i> -value		
	(n = 4)		(n = 4)			Treatment	Season	Treatment × season
	Moderate	Hot	Moderate	Hot				
Total VFA ¹ (mmol/L)	105.7	106.1	97.7	94.9	4.7	0.124	0.762	0.694
Composition (%)								
Acetic acid	56.2	54.9	55.6	56.1	1.1	0.773	0.724	0.455
Propionic acid	29.0	25.8	27.6	26.4	2.4	0.901	0.282	0.622
Butyric acid	12.3	16.1	14.3	14.4	1.5	0.946	0.166	0.201
Acetic : Propionic ratio	2.0	2.2	2.0	2.2	0.2	0.868	0.319	0.945
ammonia-nitrogen (mg/dL)	4.0 ^b	15.8 ^a	5.0 ^{ab}	9.6 ^{ab}	2.5	0.343	0.014	0.179

Moderate, Hot; See the footnotes in Table 3.1.1

SE, Standard error; VFA, Volatile fatty acid.

^{a,b}Means within a row with different superscript letters differ ($P < 0.05$)

Table 3.1.5 Effects of restricted feeding or different environmental conditions on the blood profile of Japanese Black fattening steers

Item	Control group		Restricted group		SE	<i>P</i> -value		
	(n = 4)		(n = 4)			Treatment	Season	Treatment × season
	Moderate	Hot	Moderate	Hot				
TP (g/dL)	6.7 ^b	7.1 ^a	6.7	6.9	0.1	0.592	0.001	0.022
Alb (g/dL)	3.68	3.66	3.56	3.60	0.06	0.200	0.775	0.525
A/G ratio	1.24	1.07	1.13	1.11	0.04	0.510	0.032	0.060
T-cho (mg/dL)	151.3	125.8	151.0	113.8	9.6	0.567	0.014	0.544
AST (U/L)	112.3	62.3	95.8	69.5	31.0	0.884	0.243	0.709
BUN (mg/dL)	17.9	11.3	18.5	8.7	1.5	0.642	< 0.001	0.086
IP (mg/dL)	8.3	7.9	7.9	7.5	0.4	0.365	0.119	0.960
Ca (mg/dL)	9.8	9.9	9.8	9.5	0.2	0.306	0.640	0.152
VA (IU/dL)	86.3	86.8	88.8 ^a	70.8 ^b	8.6	0.584	0.037	0.030

Moderate, Hot; See the footnotes in Table 3.1.1

SE, Standard error; TP, total protein; Alb, albumin; A/G ratio, albumin/globulin ratio; T-cho, total cholesterol;

AST, aspartate aminotransferase; BUN, blood urea nitrogen; IP, inorganic phosphorus; Ca, calcium; VA, vitamin A.

^{a,b}Means within a row with different superscript letters differ ($P < 0.05$).

2 節 発育，飼料摂取量，および枝肉成績への影響

3.2.1 目的

本章 1 節では，黒毛和種肥育牛へ肥育中期以降制限給与を実施し，肥育後期の暑熱期と適温期の飼料消化性について比較検討した．その結果，飽食飼養では暑熱期に適温期と比べて CP 消化率が低下し蓄積窒素割合が減少したのに対して，制限給与では暑熱期における CP 消化率の低下が抑制され蓄積窒素割合は適温期と同等に維持されていた．そのため，制限給与は暑熱期における黒毛和種肥育後期牛の飼料消化性を適温期と同等に維持できることが示唆された．その上適温環境では，制限給与は飽食と比較して飼料効率が增加することが明らかにされている（Fox ら 1972；Hicks ら 1990；Murphy と Loerch 1994）．黒毛和種肥育牛については，飼料の制限給与に関する報告はいくつかみられる（村元ら 2002；坂下ら 2004）ものの，主に枝肉成績に及ぼす影響を検討したものであり，飼料効率に関する知見はない．

そこで本節では，制限給与が飼養成績および枝肉成績に及ぼす影響について検討した．

3.2.2 材料および方法

1) 供試牛と飼養管理

供試牛は本章 1 節で用いた黒毛和種去勢牛 8 頭とした。処理区および飼養管理は本章 1 節と同様である。Fig. 3.2.1 に、体重 600 kg の場合の実際の飼料給与量の例を示した。

動物の飼育および動物を使用した実験については、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のガイドラインに従って実施した。

2) 飼料摂取量，発育，および枝肉成績

体重は，2 週間ごとに測定した。飼料摂取量は，毎日 15:00 に粗飼料と濃厚飼料の残餌をそれぞれ計量し，給与飼料量から残量を差し引いて求めた。

供試牛は全頭試験終了後に屠畜解体して，公益社団法人日本食肉格付協会により枝肉評価を受けた。

3) 血液の採取および血中 T_3 濃度の分析

血液は，試験開始時，4 カ月後，8 カ月後（肥育中期終了時），および 15 カ月後（肥育後期終了時）に採取した。採血の方法は，第 2 章 2 節と同様である。

血中 T_3 濃度は，自動血液分析装置（コバス 8000 E801; ロシュ・ダイアグノスティックス株式会社，東京，日本）を用いて，電気化学発光法で定量した。なお，分析は日本老化制御研究所（静岡，日本）に依頼した。

4) 統計解析

データの解析処理は、SAS MIXED プロシジャを用いて行った(JMP[®] 12;SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

飼養成績および血中 T₃ 濃度は、以下の混合モデルで解析し、その後、飼養成績は一元配置として肥育中期、後期、および試験期間全体の別に解析した。

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_k + \alpha \times \gamma_{jk} + e_{ijk}$$

Y_{ijk} : 測定値 ijk

μ : 総平均

α_i : 処理 i の効果

β_{ij} : 処理 i における個体 j の効果

γ_k : 肥育ステージ k もしくは時期 K の効果

$\alpha \times \gamma_{ik}$: 処理 i と肥育ステージ k もしくは時期 K の交互作用

e_{ijkl} : 誤差 ijk

枝肉成績は一元配置分散分析により解析した。

いずれの混合モデルも、処理における個体の効果は変量模型として取り扱った。また、F検定により、危険率 5%未満の場合を有意差があるものとした。

3.2.3 結果

制限給与が黒毛和種肥育牛の飼養成績に及ぼす影響を Table 3.2.1 に示した。代謝体重当たりの飼料摂取量は、肥育中期では制限区が飽食区よりも有意に少なかったが、後期では逆に制限区が増える傾向 ($P < 0.10$) を示した。月ごとの代謝体重当たりの飼料摂取量の推移 (Fig. 3.2.2) では、試験開始から肥育中期の中頃までは飽食区に比べて制限区で少なかった ($P < 0.05$) が、肥育中期の終り頃である 21~23 カ月齢にかけて飽食区の摂取量が顕著に減少した。そして、24 カ月齢における代謝体重当たりの飼料摂取量は制限区が飽食区を若干上回った ($P < 0.10$) が、その後両区はほぼ同等で推移した。代謝体重当たりの TDN 摂取量は、飼料摂取量を反映し、肥育中期では飽食区よりも制限区で少なかった ($P < 0.05$) が、肥育後期では制限区が若干多かった ($P < 0.10$)。摂取飼料に占める濃厚飼料割合の週ごとの推移を Fig. 3.2.3 に示した。濃厚飼料割合は、飽食区では増減を繰り返していたのに対し、制限区では試験期間を通して安定した推移を示した。肥育中期における両区の DG に差は認められなかったが、肥育後期に入ると制限区が顕著に上回った ($P < 0.05$)。試験期間全体の DG は、飽食区と制限区に差は認められなかった。飼料効率は、肥育中期では制限区が飽食区を上回り ($P < 0.05$)、後期も引き続き制限区が高い傾向 ($P = 0.06$) を示した。試験期間全体でも制限区の飼料効率は有意に高まった。

Fig. 3.2.4 に、血中 T_3 濃度の推移を示した。飽食区、制限区、ともに月齢の進行に伴い血中 T_3 濃度は有意に減少した。しかし、同時期における両区の値には、いずれも有意な差は認められなかった。

Table 3.2.2 に枝肉成績を、Fig. 3.2.5 に胸最長筋の断面を、それぞれ示した。枝肉重量、胸最長筋面積、ばらの厚さ、皮下脂肪の厚さ、歩

留基準値，および脂肪交雑基準値のいずれの項目も処理区間に差は認められなかった。

3.2.4 考察

本章 1 節では，制限給与が肥育後期の暑熱期における CP 消化率および窒素利用性低下を抑制することを明らかにした．本節では，制限給与を 15 カ月間実施したことによる，飼養成績および枝肉成績への影響について検討した．

外国種の肉用牛では，制限給与により背脂肪の減少（Murphy と Loerch 1994）や蓄積タンパクの増加（Hornick ら 1998）等の効果が示されているが，中でも生産性に直結する重要なメリットは飼料効率の向上である．ヘレフォード種や交雑種を用いた研究では，制限給与は飽食に比較して飼料効率が 4～15%程度増加する結果が得られている（Fox ら 1972; Hicks ら 1990; Murphy と Loerch 1994）．本研究では，制限区の飼料効率は飽食区に比べて肥育中期に 6%高まり（ $P < 0.05$ ），後期においても高まる傾向（ $P < 0.10$ ）を示した．試験期間全体を通じた飼料効率も制限給与が飽食給与よりも 7%高まった（ $P < 0.05$ ）．このため，黒毛和種去勢肥育牛においても，制限給与は飼料効率の向上に寄与することが明らかになった．

制限給与は，飼料消化率の増加（Murphy と Loerch 1994）や飼料摂取量の安定化（Hicks ら 1990）等の影響をもたらし，飼料効率が増加する．本研究では，肥育中期の代謝体重当たりの飼料摂取量は，飽食区よりも制限区で明らかに少なかった．そのため，肥育中期では制限給与により飼料消化率が高まった可能性が考えられ，飼料摂取量が少なくても，飽食と同等の DG を維持できたものと考えられた．他方，肥育後期の代謝体重当たりの飼料摂取量は，中期とは逆に，飽食区よりも制限区で少ない傾向であった．一般に黒毛和種牛の肥育では，長期に渡る濃厚飼料の飽食給与により，肥育中後期では飼料摂取

量が減少する，いわゆる“食い止まり”が生じる（森下ら 2004；千田ら 2014）．そして，体重が 600 kg 以上になると増体が鈍化し，飼料効率が低下する（三津本ら 1989）．本研究の飽食区では，肥育の進行による食い止まりや飼料効率の低下が生じていた．しかし，制限区では食い止まりが抑制され，飼料摂取量が維持されたことで DG および飼料効率の低下が防止されたものと考えられた．さらに，粗濃比の変動は第一胃内発酵に変化をもたらす（Owens ら 1998）．本研究の制限区では，飼料摂取量と濃厚飼料の摂取割合が安定的に推移しており，第一胃内発酵の変化も少なかったものと推察される．このことも，本研究における制限区の飼料効率向上に寄与した可能性が考えられた．

制限給与による飼料効率の向上には，海外の交雑種では血中 T_3 濃度の低下による維持エネルギーの減少（Murphy と Loerch 1994）との関連性が指摘されている．しかし，本研究では，血中 T_3 濃度に制限給与による影響は認められなかった．黒毛和種の肥育では枝肉の BMS 評価を向上させるために肥育中期に VA の給与を制限するが，血中 VA 濃度が低下すると血中 T_3 および IGF-1 濃度が減少する（Oka ら 1998b）．本試験では，両区の血中 T_3 濃度は肥育の進行に伴い有意な減少を示しており，Oka ら（1998b）の報告と一致していた．また，Oka ら（1998b）は，血中 T_3 濃度が減少した原因について，サイロキシンから T_3 への変換に VA が関係していることを挙げている．また，本研究において測定された血中 T_3 濃度は 1.5 から 2.5 ng/ml の間で変動していたが，Murphy と Loerch（1994）が示した血中 T_3 濃度は 2.0 から 2.75 ng/ml の間で変動していた．そのため，黒毛和種肥育牛の血中 T_3 濃度には，制限給与による影響よりも VA 制限による影響

が強く表れたため、VA 制限を行わない海外の肉用牛を対象とした既往の報告と異なると考えられた。

黒毛和種の肥育中期における TDN 給与量を DG0.70 kg に必要な量に制限すると、枝肉成績は飽食給与と変わらない (坂下ら 2004)。また、同じ黒毛和種の肥育でも、肥育全期間の濃厚飼料給与量を体重比 1% に制限する条件では、飽食給与よりも枝肉重量が減少した (村元ら 2002)。このように、枝肉成績に及ぼす制限給与の影響は、制限給与のレベルおよび期間によって異なると考えられる。本研究では飽食区と制限区の枝肉成績はいずれの項目も同等であった。そのため、本研究で設定した制限期間およびレベルは、枝肉成績に影響を及ぼさない程度であったと考えられた。

試験期間中の 1 頭当たりの飼料費は、濃厚飼料を 65 円/kg、粗飼料を 55 円/kg (いずれも購入時単価) とした場合、飽食区で 268,928 円、制限区で 258,150 円であり、制限給与により 10,778 円削減された。平成 28 年度の去勢若齢肥育牛 1 頭当たりの生産費のうち、飼料費は 26.9 % と高い割合を占めており (農林水産省 2018)、肥育経営を圧迫している。そのため、制限給与は肥育経営の安定化に寄与する飼養管理として有望であることが明らかになった。

本研究は、肥育後期における暑熱対策としての制限給与の効果を検討するため、暑熱期は肥育後期に該当するように設定した。そのため、肥育中期の暑熱期における飼料消化性は検討しておらず、今後の課題である。しかし、本研究の肥育中期における飼料摂取量は、飽食区よりも制限区で有意に減少していた。また、第 2 章 1 節の肥育中期の暑熱期における代謝体重当たりの飼料摂取量 ($82.6 \text{ g/kgBW}^{0.75}$) と比べても、制限区と同摂取量 ($79.1 \text{ g/kgBW}^{0.75}$) は少なかった。その

ため、本試験で用いた制限給与の設定は、肥育中期の暑熱期においても DM 摂取量を制限しうる水準であり、飼料消化率向上の効果をもたらすものと推察される。また、エネルギー摂取が減少することによる暑熱期の代謝熱負荷の抑制効果（Mader ら 2002; Mader と Davis）も期待できる。ただし血中 VA 濃度が低下するため、血中 T₃ 濃度には制限給与による影響はほとんどない可能性がある。

以上より、肥育中期から後期にかけての黒毛和種去勢肥育牛への飼料の制限給与は、安定的な飼料摂取を促すことで、食い止まりや飼料効率の低下を抑制することが明らかになった。一方で、血中 T₃ 濃度には制限給与の効果は明確ではなかった。そして、本研究で設定した制限レベルは、枝肉成績に影響しないことが示された。

本章 1 節および 2 節の結果から、黒毛和種肥育牛への制限給与は肥育後期暑熱期の飼料消化性と肥育中期および後期の飼料効率の向上に有効であることが明らかになった。しかし、本研究で設定した制限レベルでは、肥育後期における濃厚飼料の摂取量は飽食とほぼ同等となることが示された。濃厚飼料多給の飼養では、暑熱期においてデンプン減退による繊維成分消化率の減少が顕著となることが報告されている（黒肥地ら 1967）。また暑熱期においては、発酵熱抑制の観点から、消化性の良い繊維成分の給与が推奨されている（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）。したがって、制限給与体系において暑熱期のデンプン摂取量を抑制することや、消化性に優れる繊維成分の給与を検討することで、さらに飼料消化性を改善できる可能性がある。

そこで第 4 章では、制限給与による暑熱期の飼料消化性改善の効果をさらに高めることを目的に、制限給与体系に濃厚飼料の代替となる

繊維質飼料である KP を取り入れた給与技術について検討した。

3.2.5 要約

飼料の制限給与が黒毛和種肥育牛の飼養成績に及ぼす影響について検討した。なお、供試牛および処理の方法は本章 1 節と同一である。その結果、制限給与により安定的な飼料摂取を促すことで、食い止まりや飼料効率の低下が抑制されることが明らかになった。また、枝肉成績には制限給与による影響は認められなかった。

以上のことから黒毛和種肥育牛への制限給与は、肥育後期暑熱期の飼料消化性と肥育中期および後期の飼料効率の向上に有効であることが明らかになった。

3.2.6 図表



Fig. 3.2.1 Example of feed volume (the weight of both groups was approximately 600 kg). Left: Control group; Right: Restricted group.

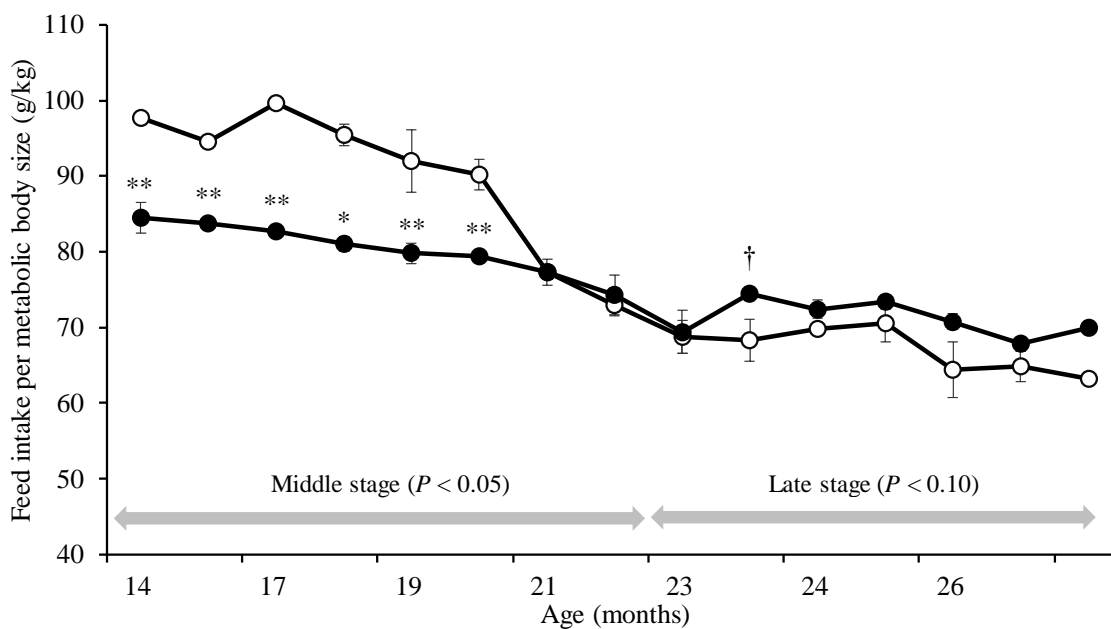


Fig. 3.2.2 Monthly changes in feed intake (as fed basis) per metabolic body size for control group (white circles) and restricted group (black circles) of Japanese Black fattening steers. Mean \pm SE. **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$, †: $P < 0.10$

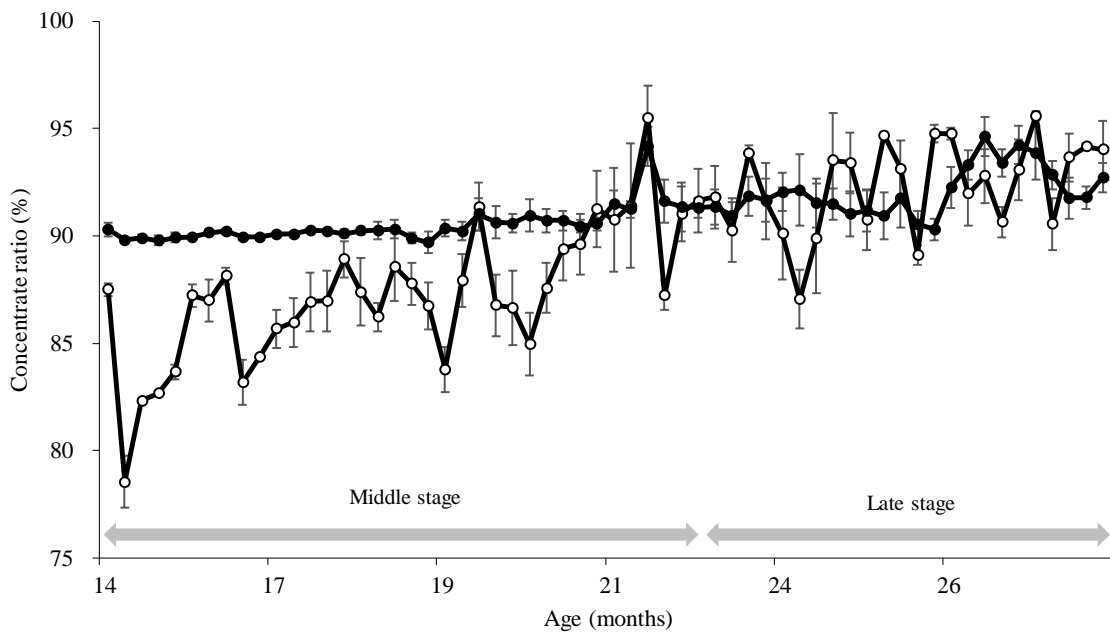


Fig. 3.2.3 Weekly changes in concentrate ratio for control group (white circles) and restricted group (black circles) of Japanese Black fattening steers. Mean \pm SE. Concentrate ratio: The ratio of concentrate to feed intake (as fed basis).

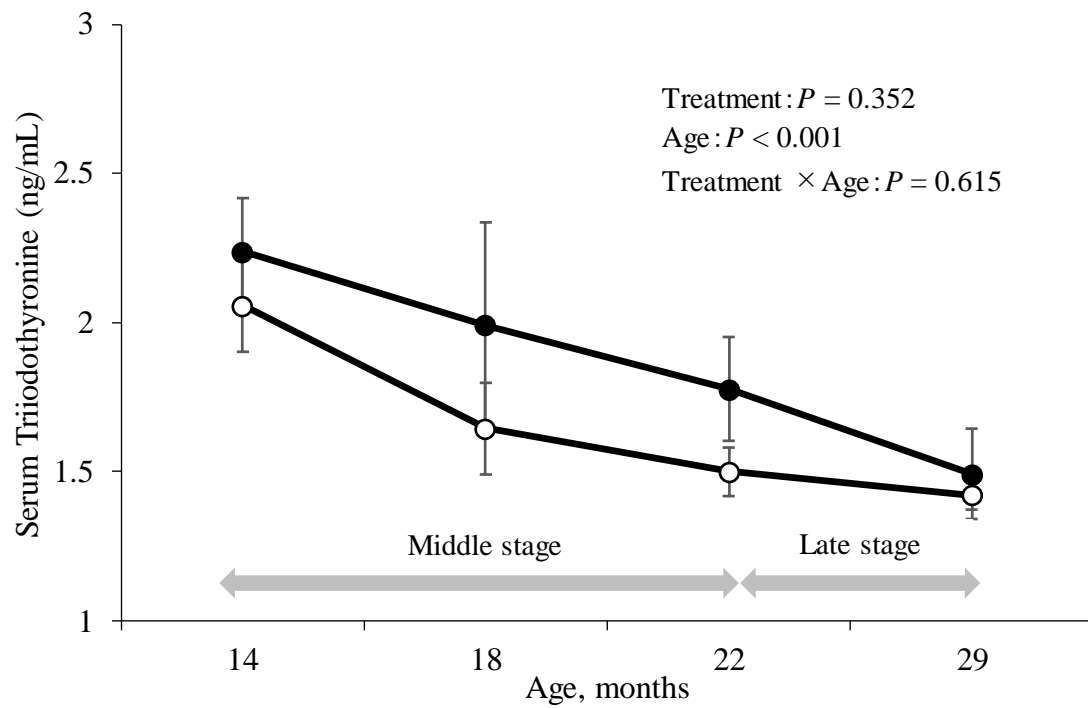


Fig. 3.2.4 Effect of restricted feeding on serum triiodothyronine concentrations for control group (white circles) and restricted group (black circles) of the Japanese Black fattening steers. Mean \pm SE.



Fig. 3.2.5 Cross-section of Japanese Black fattening steers showing the effect of restricted feeding. Upper picture: Control group; lower picture: Restricted group

Table 3.2.1 Effects of restricted feeding on intake and performance of Japanese Black fattening steers

Item	Control group (n = 4)	Restricted group (n = 4)	SE	P -value
Age (day)				
Initial	441.8	429.5	5.9	0.153
Final	861.8	849.5	5.9	0.153
BW (kg)				
Initial	449.3	452.3	12.9	0.875
Final	794.0	808.0	21.0	0.654
Feed intake ^{B,C} (g/BW ^{0.75} /day)				
Middle period ¹	87.61	79.13	0.96	0.001
Late period ²	66.96	71.61	1.37	0.053
Overall	79.56	76.25	0.97	0.053
TDN intake ^{B,C} (g/BW ^{0.75} /day)				
Middle period	60.98	56.06	0.70	0.003
Late period	47.91	50.69	0.90	0.071
Overall	55.88	54.00	0.74	0.125
DG ^{B,C} (kg/day)				
Middle period	0.93	0.88	0.03	0.260
Late period	0.61	0.78	0.04	0.021
Overall	0.84	0.85	0.03	0.836
Feed efficiency ^{3, A, B} (g/kg)				
Middle period	89.4	95.1	2.5	0.037
Late period	71.7	78.9	2.2	0.061
Overall	82.7	89.2	1.7	0.036

SE, Standard error; BW, body weight; TDN, total digestible nutrients; DG, daily gain.

¹14-22 months of age

²23-29 months of age

³DG/feed intake

^AFeeding treatment effect ($P < 0.05$).

^BFattening period effect ($P < 0.05$).

^CFeeding treatment \times fattening period effect ($P < 0.05$).

Table 3.2.2 Effects of restricted feeding on carcass characteristics of Japanese Black fattening steers

Item	Control group (n = 4)	Restricted group (n = 4)	SE	<i>P</i> -value
Carcass characteristics				
Carcass weight (kg)	506.3	513.4	14.6	0.740
Rib eye area (cm ²)	65.5	59.3	5.6	0.459
Rib thickness (cm)	8.4	8.5	0.3	0.806
Subcutaneous fat thickness (cm)	3.5	3.2	0.3	0.457
Yield estimate	74.0	73.5	0.8	0.675
Beef marbling standard (BMS No.)	6.8	6.3	0.6	0.595

SE, Standard error.

第4章 制限給与下の黒毛和種肥育後期牛への暑熱期における木材クラフトパルプの給与が飼料摂取量，発育，飼料消化性，および第一胃発酵に及ぼす影響

4.1 緒言

第2章では，黒毛和種肥育牛は肥育後期の暑熱期に適温期と比べて飼料消化性が低下することを明らかにし，飼料消化性低下を抑制することが暑熱期の生産性改善につながると考えられた．そこで第3章では，肥育後期の暑熱期における飼料消化性を改善する対策として制限給与技術を採上げ，黒毛和種肥育牛への制限給与が肥育後期の飼料消化性に及ぼす影響を検討した．その結果，制限給与は肥育後期の暑熱期において飼料消化率，特に CP 消化率の低下を抑制し窒素利用性を適温期と同等に維持した．しかし，本研究で設定した制限レベルでは，肥育後期における濃厚飼料摂取量は飽食とほぼ同等となることが示された．一般に濃厚飼料を多給される反芻家畜は，デンプンの多量摂取により繊維成分消化率が低下しやすい（神立と須藤 1985）．さらに，暑熱環境下ではこの作用が顕著となることが報告されている（黒肥地ら 1967）．また，暑熱期に給与される繊維成分は，発酵熱抑制の観点から消化性の良いものが推奨されている（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．したがって，制限給与体系において濃厚飼料の代替となる消化性の良い繊維質飼料を給与することで，暑熱期の飼料消化性をさらに改善できる可能性が考えられる．

近年，圧ペントウモロコシと同等の TDN を有していながら NDF を豊富に含む飼料として，KP が開発されている（Hada ら 2016）．KP は，アルカリ処理により木材から第一胃内で分解し難いリグニンを選択的に除去した飼料で，消化性に優れている．また泌乳牛へ KP を圧

ペントウモロコシの代替として給与したところ，乳生産や乳質に影響を及ぼすことなく，胃液 pH の上昇と胃液 LPS 活性値の減少といった第一胃発酵の安定に寄与することが報告されている（Nishimura ら印刷中）．したがって，KP を濃厚飼料の代替として黒毛和種肥育牛へ給与することで，エネルギー給与を低減させることなく，デンプン摂取量の抑制と消化性に優れた繊維成分の供給が可能となる．それにより，暑熱期の飼料消化性の改善と第一胃発酵の安定につながるものが考えられる．しかしながら，これまでに黒毛和種肥育牛への KP 給与に関する報告はない．

そこで本章では，暑熱期に制限給与体系で飼養する黒毛和種肥育牛へ給与する濃厚飼料の一部を KP に代替した場合の飼料消化性への効果を検討した．

4.2 材料および方法

1) 供試牛と飼養管理

供試牛は 26 カ月齢の黒毛和種去勢牛 10 頭とし，7 月から 9 月の暑熱期を試験期間とした．処理区は，KP を含まない濃厚飼料を給与する（対照）区と，濃厚飼料のうち乾物当たり 10% を KP に代替した飼料を給与する（KP）区の 2 区を設定し，それぞれに 5 頭ずつ供試牛を配置した．KP は，日本製紙株式会社（東京，日本）より供給されたものを用いた（Fig. 4.1）．両区とも粗飼料には稲わらを給与した．給与飼料の配合割合および成分を Table 4.1 に示した．なお，KP 区の供試牛には，始めは KP を含まない濃厚飼料を給与し，その後試験開始 4 週前から試験開始時にかけて KP の配合割合を 10% まで漸増させた．

飼料給与量は，第 3 章 1 節の制限給与の条件で個体ごとに設定した．飼料給与の方法および飼養管理は，第 2 章 1 節と同様とした．なお，肥育中期の 14 カ月齢から試験開始前の 25 カ月齢までは，供試牛は全頭とも同じ市販の配合飼料と粗飼料を用いて，第 3 章 1 節の制限給与の条件で飼養した．

本研究は，宮崎県畜産試験場動物実験委員会により試験計画を承認され実施したものである．

2) 飼料摂取量，発育，血液性状，および第一胃液性状

飼料摂取量は，飼料給与量より残餌量を減じて毎日算出した．体重は 2 週ごとに 13:00 に計量した．試験開始-4，0，4，8，および 12 週には，体重測定後に血液および第一胃液を採取した．血液および胃液の採取方法は，第 2 章 2 節と同様である．採取した血液は，第 2 章 2 節と同様に処理した．第一胃液は，滅菌された 4 重ガーゼでろ過後，ろ

液の一部を LPS 測定のため、Hirabayashi ら (2017) の方法で処理した。残りのろ液は、VFA および NH₃-N 含量の測定のため、第 2 章 2 節と同様に処理した。

3) 飼料消化率，窒素利用率，および胃液 pH と温度

試験開始 4 週から 8 週にかけて，飼料消化率，窒素利用率，および胃液 pH と胃液温度を測定した。

飼料消化率および窒素出納は，予備期 7 日間，本期 3 日間とする全糞全尿採取法により算出した。本期に採取した糞および尿は，4°C で保存し，供試牛ごとに各採取日の糞および尿をそれぞれ混合して分析サンプルとした。

胃液 pH および胃液温度は，無線伝送式 pH センサー（山形東亜 DKK 株式会社，山形，日本）（Fig. 4.2）を経口投与し胃内へ留置して測定した。測定期間は試験開始 6 週から 8 週にかけての 10 日間とし，胃液 pH と胃液温度を 10 分ごとに連続的に測定した。得られた pH および温度のデータは，60 分ごとの平均値を計算した。

4) 試料分析

給与飼料および糞の DM，OM，CP，EE，aNDFom，およびデンプンの分析方法，血漿中 VA 濃度の分析方法，ならびに第一胃液の VFA 濃度の分析方法は第 2 章 2 節と，尿中の CP 濃度および第一胃液中の NH₃-N 濃度の分析方法は第 3 章 1 節と，それぞれ同様である。

血漿中 TP，Alb，A/G，T-Chol，TG，AST，BUN，Glu，Ca，総ケトン体（T-KB），および IP 濃度は，血液自動分析装置（HITACHI 7070；株式会社日立製作所，東京，日本）により測定した。血漿中成長ホルモ

ン (GH) 濃度は, 放射免疫測定法 (Hirabayashi ら 2017) により定量した. 血漿中インスリン (Ins) (AKRIN-010T; 富士フイルム和光純薬化学工業, 東京, 日本), 血漿 LPS 結合蛋白 (LBP) (HK503 kit; Hycult Biotech, Uden, Netherlands), 血清アミロイド A (SAA) (TP-802; Tri-Delta Diagnostics Inc., Cedar Knolls, NJ), およびハプトグロビン (Hp) (HAPT-11; Life Diagnostics, Inc., PA, USA) 濃度は, 市販の ELISA キットにより定量した.

第一胃液中 LPS 活性値の測定は, Hirabayashi ら (2017) の方法で行った.

5) 統計処理

データの解析処理は, SAS MIXED プロシジャを用いて行った (JMP[®] 12; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). なお, KP 区の供試牛 1 頭は, 疾病により飼料摂取量および DG が減少したため, 当該期間のデータは解析から除外した.

飼養成績, 飼料消化率, および窒素利用率の差は, 一元配置分散分析により解析した. 血液性状と第一胃液性状の推移ならびに胃液 pH および胃液温度の日内変動については, 以下の混合モデルで解析した.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_k + \alpha \times \gamma_{jk} + e_{ijk}$$

Y_{ijk} : 測定値 ijk

μ : 総平均

α_i : 処理 i の効果

β_{ij} : 処理 i における個体 j の効果

γ_k : 期間 k もしくは時間 k の効果

$\alpha \times \gamma_{ik}$: 処理 i と期間 k もしくは時間 k の交互作用

e_{ijkl} : 誤差 ijk

混合モデルでは，処理における個体の効果は変量模型として取り扱った．また，F検定により，危険率5%未満の場合を有意差があるものとした．血液性状と第一胃液性状については，処理と期間に交互作用が認められた場合，対比により期間ごとに処理の差を解析した．

4.3 結果

試験期間中の体重，DG，飼料摂取量，濃厚飼料摂取割合，および飼料効率を Table 4.2 に示した．試験期間中の DG は両区に差が認められなかったため，終了時体重も同等であった．代謝体重当たりの DM 摂取量は両区に差はみられなかった．代謝体重当たりの TDN 摂取量は，KP 区で対照区に比べて少ない傾向 ($P = 0.063$) であった．濃厚飼料摂取割合および飼料効率は，両区に有意差は認められなかった．

血液性状の推移を Table 4.3 に示した．血漿中 TP，Alb，A/G，T-Cho，TG，AST，BUN，Ins，GH，T-KB，Ca，VA，SAA，および Hp 濃度には，処理区間に差は認められなかった．しかし，血漿中 Glu，IP，および LBP 濃度は，期間における処理の効果が両区で異なっていた (Fig. 4.3)．まず，推移については，血漿中 Glu 濃度は，対照区では 0 週において -4 週より減少し ($P < 0.05$)，KP 区は -4 週以降，有意に減少した．血漿中 IP 濃度について，対照区では週の経過による影響は認められなかったが，KP 区では -4 週に比べて 0 週で高値を示した ($P < 0.05$)．血漿中 LBP 濃度は，対照区で -4 週より，0 週，8 週，および 12 週に低値を示し ($P < 0.05$)，KP 区で 0 週と 12 週において -4 週よりも低値を示した ($P < 0.05$)．同時期における両区の比較について，血漿中 IP 濃度は 0 週で，血漿中 LBP 濃度は 8 週で，KP 区が対照区を上回った ($P < 0.05$)．血漿中 Glu 濃度には，同時期の両区に有意な差は認められなかった．

第一胃液性状の推移を Table 4.4 に，A/P 比の推移を Fig. 4.4 に示した．第一胃液中の総 VFA 含量は，両区は同等であった．また，酢酸，プロピオン酸，および酪酸のモル比率には，KP 給与による差は

認められなかった。しかし A/P 比は、対照区では週の経過による差は認められなかったが、KP 区は-4 週よりも 8 週および 12 週で有意に高まった。そして、KP 給与後 8 週および 12 週の A/P 比は、対照区よりも KP 区で高かった ($P < 0.05$)。第一胃液中の $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度および LPS 活性には、両区に有意な差は認められなかった。

胃液 pH (対照区 vs. KP 区 = 6.36 vs. 6.08; $P = 0.172$; データ未提示) および胃液温度 (対照区 vs. KP 区 = 38.7°C vs. 38.3°C ; $P = 0.150$; データ未提示) の日平均は、両区はほぼ同等であった。胃液 pH と胃液温度の日内変動を Fig. 4.5 に示した。胃液 pH および胃液温度ともに、KP 区が対照区を下回って推移したものの、統計的に有意ではなかった。

飼料消化率を Table 4.5 に示した。消化試験時の DM 摂取量は、両区は同等であった。また、代謝体重当たりの DM, CP, および TDN 摂取量も、両区に有意な差は認められなかった。DM, OM, CP, EE, aNDFom, NFC, およびデンプンの消化率には、KP 給与による差は認められなかった。窒素出納を Table 4.6 に示した。糞中窒素, 尿中窒素, および蓄積窒素のいずれの割合においても、両区に有意な差は認められなかった。

4.4 考察

本研究では，両区の DM 摂取量に有意差は認められなかった．蒸煮シラカンバをホルスタイン種去勢牛へ給与したところ，DM 摂取量は蒸煮シラカンバを給与しない対照区と同等であった（梶川ら 1987）．また，蒸煮ポプラを羊へ給与しても，代謝体重当たりの DM 摂取量にポプラ給与の影響は認められていない（Sharma ら 1979）．本試験の結果は，これら既往の研究と一致するものであった．しかし TDN 摂取量は，対照区に比べて KP 区で少ない傾向であった．このことには，KP 区の濃厚飼料摂取割合が対照区よりも 2.3% 少なかったことが影響している．一般に飼料中の繊維含量が高まると，飼料摂取量は減少する（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．本研究で給与した濃厚飼料中の NDF 割合は，KP 区では対照区よりも 6.4% 高い．加えて，繊維成分の最大摂取量は，牛の品種，飼料構成，および肥育ステージによって異なるが，NDF 割合で 30% 前後とされている（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）．両区の濃厚飼料摂取割合から摂取 NDF 割合を算出すると，対照区では 21.5%，KP 区では 28.4% であった．これらのことから，KP 配合により濃厚飼料中の NDF 割合が増加し最大摂取量近くまで摂取飼料中の NDF 割合が高まったことが，濃厚飼料ならびに TDN 摂取量の減少に影響した可能性が考えられた．また，本研究では粗飼料を先に給与し，10～20 分経過後に濃厚飼料を給与する飼養管理を行っている．このことも，濃厚飼料摂取の違いに影響したものと考えられた．

本研究では，対照区と KP 区の DG や飼料効率に有意な差は認められなかった．既往の研究では，木質飼料を粗飼料と濃厚飼料のどちら

の代替とするかによって発育に及ぼす影響は異なる。例えば、蒸煮シラカンバをアルファルファヘイキューブの代替としてホルスタイン種去勢牛に給与しても、DGに影響を及ぼさない（梶川ら 1987）。一方で、亜硫酸塩処理した木質飼料を大麦の代替として肉用牛へ給与すると、DGは有意に減少した（ClarkeとDyer 1973）。木質飼料の消化性は、木材の処理方法に依存する（Baker 1973; Millettら 1973）。Baker（1973）は、リグニンの除去率が0%から96.5%に上がると、*in vitro*のDM消化率は12%から90%に増加することを報告している。蒸煮処理した木質飼料のリグニン割合およびDM消化率は、それぞれ、13.0%と60.6%である（Takigawa 1987）。本試験で給与した、アルカリ処理したKPのリグニン割合は4%以下であり、*in situ*のDM消化率は90%以上である（Hadaら 2016）。これらのことから、KPは従来の木質飼料よりも消化性に優れるため、濃厚飼料の代替として給与してもDGや飼料効率に影響を及ぼさなかったものと考えられた。

暑熱環境下における黒毛和種肥育牛の飼料消化率は、第2章2節の結果から減少することが示され、その原因の1つは濃厚飼料の多給と考えられた。一般に、濃厚飼料の摂取割合が高まると繊維成分の消化率は減少する（神立と須藤 1985）。そして、暑熱期の肥育牛は、デンプン減退による繊維成分消化率の低下が顕著となる（黒肥地ら 1967）。消化試験の結果では、KP給与によりデンプン摂取割合は2.9%減少（対照区 vs. KP区 = 48.8% vs. 45.9%; $P = 0.035$; データ未提示）した。そして、aNDFom消化率は、有意ではないが、対照区に比べてKP区で4.7%高い値を示し、その他の成分の消化率もKP区では1.4から2.9%高値を示した。そのため、黒毛和種肥育牛へKPを濃

厚飼料の代替として給与することにより、暑熱期における濃厚飼料多給による飼料消化率の低下，特に NDF 消化率の減退を抑制できる可能性が示唆された。

本研究で調査した血液成分の項目は，いずれも臨床的正常範囲であった (Kaneko 1983; Adachi ら 1999; Nakamura ら 2008)。しかし，血漿中 Glu 濃度は KP 給与後 8 週および 12 週で給与前に比べて有意に減少した。そして，胃液性状の推移では，A/P 比において KP 給与後 8 週および 12 週では対照区より KP 区で有意な高値を示した。反芻家畜は，その糖新生の基質のほとんどを VFA 中のプロピオン酸に依存している (Young 1977)。本研究における血漿中 Glu 濃度の推移は，第一胃内における A/P 比の変動を反映した結果と考えられる。なお，木質飼料の給与は NDF 摂取割合を増加させ，デンプン摂取割合を減少させることから，胃液中の A/P 比が増加する (Clarke と Dyer 1973; Nishimura ら 印刷中)。本研究の結果は，既往の知見とほぼ一致するものであった。血漿中 IP 濃度は，炭水化物代謝と関係する (Kaneko 1983) ものの，KP 区の Glu 濃度の変化との関連性は不明である。

デンプン摂取量が増加すると胃液 pH が低下し，胃液中の LPS 活性が増加する (Palizier ら 2012)。消化試験時のデンプン摂取割合は，前述のとおり対照区よりも KP 区で有意に少なかったが，両区の胃液 pH および LPS 活性値に差は認められなかった。これまでに，乳用牛においては，摂取飼料の濃厚飼料割合が 35%以上，もしくは摂取飼料中の NDF 割合が 44.7%以下の場合に，胃液 LPS 活性値が増加することが報告されている (Zebeli ら 2012)。しかし，本試験における両区の濃厚飼料摂取割合は 90%を超えており，消化試験時の aNDFom

摂取割合は 30%以下（対照区 vs. KP 区 = 24.5 % vs. 27.0 %, $P = 0.467$; データ未提示）であった．黒毛和種肥育牛において SARA に関する指標は報告されていない．しかし，黒毛和種は肥育中後期において濃厚飼料の摂取割合が 85%以上となる（独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009）ため，Zebeli ら（2012）の指標をそのまま当てはめることは適当ではない．本研究では，濃厚飼料の DM 当たり 10%を KP に代替給与したが，デンプンおよび NDF 摂取に対する影響が少なかったため，胃液 pH および LPS 活性に変化がみられなかったと考えられた．

これまでに，第一胃液中の LPS 活性と血漿中の急性期タンパク質（SAA, Hp, および LBP）濃度は相互に関連していることがいくつか報告されている．例えば，胃液 pH の低下は胃液 LPS 活性値を増加させ，血漿中 SAA（Gozho ら 2005; Gozho ら 2006; Khafipour ら 2009a），Hp（Gozho ら 2005; Gozho ら 2006; Khafipour ら 2009a），および LBP（Khafipour ら 2009a）濃度が増加する．しかし，胃液 LPS 活性値の増加が急性期タンパク質の血中濃度に影響しないことも報告されている（Khafipour ら 2009b; Plaizier ら 2014）．これら見解の不一致は，同じ飼料を給与されても LPS 活性値が上昇する個体と耐性を示す個体が存在するなど，個々の応答に違いがある（Hirabayashi ら 2017）ことに起因する可能性がある．さらに，胃液中 LPS の血中移行は，消化管粘膜上皮の状況によって左右される（Plaizier ら 2012）ため，個体によって差がある．本研究では，KP 給与は胃液 LPS 活性値と血漿中 SAA および Hp 濃度に影響しないことが明らかになった．KP 給与後 8 週の血漿中 LBP 濃度は，対照区と比較して KP

区で有意に増加したが、胃液 LPS 活性との関係は本試験においては不明であった。

胃液温度は対照区と KP 区でほぼ同等であった。第一胃の発酵熱は、低質粗飼料を給与する (Fuquay 1981; Finch 1986)、もしくは、繊維成分の給与割合が高まる (Hales ら 2014) と増加し、暑熱ストレスを増長する (Fuquay 1981)。実際、暑熱期における泌乳初期の乳用牛では、飼料中 NDF 割合が 35% の場合と比べて 37% の場合では呼吸数の増加傾向が認められており、そのことは繊維成分摂取量の増加による発酵熱の上昇に起因することが指摘されている (園田ら 1999)。そして、肥育牛へ一般的に粗飼料として給与される稲わらは、*in vitro* における DM 消化率が 34%~56% と低く、低質粗飼料に分類される (永西 2002)。そのため、第一胃発酵の安定のため NDF 摂取割合を増加させる目的で稲わらの給与割合を増加させると、発酵熱が増加し暑熱ストレスを増長する可能性がある。それに対し、本試験で NDF 源として用いた KP は、*in situ* の DM 消化率が少なくとも 90% (Hada ら 2016) と良好な消化性を有している。また消化試験の結果では、有意ではないが、KP 給与により aNDFom 摂取割合は 2.5% 増加していた。このため、暑熱期に KP を NDF 源として給与すると、発酵熱による胃液温度の上昇と、それによる暑熱ストレスの増加を抑制する可能性が考えられた。

以上より、制限給与下における肥育後期の黒毛和種肥育牛へ暑熱期に濃厚飼料の乾物当たり 10% 代替として KP を給与すると、デンプン摂取が減少し、それにより NDF 消化率低下が抑制される可能性が示唆された。加えて、KP 給与による NDF 摂取の増加は胃液温度の上昇を伴わないことが推察された。しかし、濃厚飼料の給与割合が極高い

肥育後期においては、濃厚飼料の 10%を KP に代替しても、第一胃内発酵に及ぼす効果は弱いことも示唆された。このため、今後は KP の代替割合を増加させた場合について検討する必要があるが、その際には飼料中 NDF 割合の増加による DM 摂取量への影響も考慮する必要がある。また、濃厚飼料の給与割合が比較的低い肥育前期や、濃厚飼料の給与割合が増加する肥育中期の初めの時期などで、KP 給与の効果を検討する必要がある。

4.5 要約

本章では，暑熱期に制限給与体系で飼養する黒毛和種肥育牛へ給与する濃厚飼料の一部を KP に代替した場合の，飼養成績および第一胃発酵に及ぼす影響について検討した．その結果，KP 区は対照区に比べてデンプン摂取量が減少し，有意な差ではないが，飼料消化率，特に NDF 消化率は KP 区で対照区よりも高い値を示した．第一胃液性状のうち A/P 比は，試験開始 8 週および 12 週において対照区よりも KP 区で有意に高まり，KP 給与により NDF 摂取が増加していることを反映したものと考えられた．また，胃液温度は対照区と KP 区は同等であったことから，KP 給与による NDF 摂取の増加は胃液温度の上昇を伴わない可能性が考えられた．飼養成績や胃液 LPS 活性値および胃液 pH には対照区と KP 区に差は認められなかった．以上のことから，KP は黒毛和種肥育牛へ濃厚飼料の代替として給与可能であり，暑熱期に給与する飼料として適していることが示唆された．しかし，濃厚飼料の給与割合が極めて高い肥育後期においては，濃厚飼料の 10% を KP に代替しても第一胃内発酵に対する効果は弱いと考えられた．

4.6 図表



Fig. 4.1 Wood kraft pulp (Nippon Paper Industries Co., Ltd, Tokyo, Japan)



Fig. 4.2 Wireless radio transmission pH measurement system (DKK-TOA Yamagata Corporation, Yamagata, Japan)

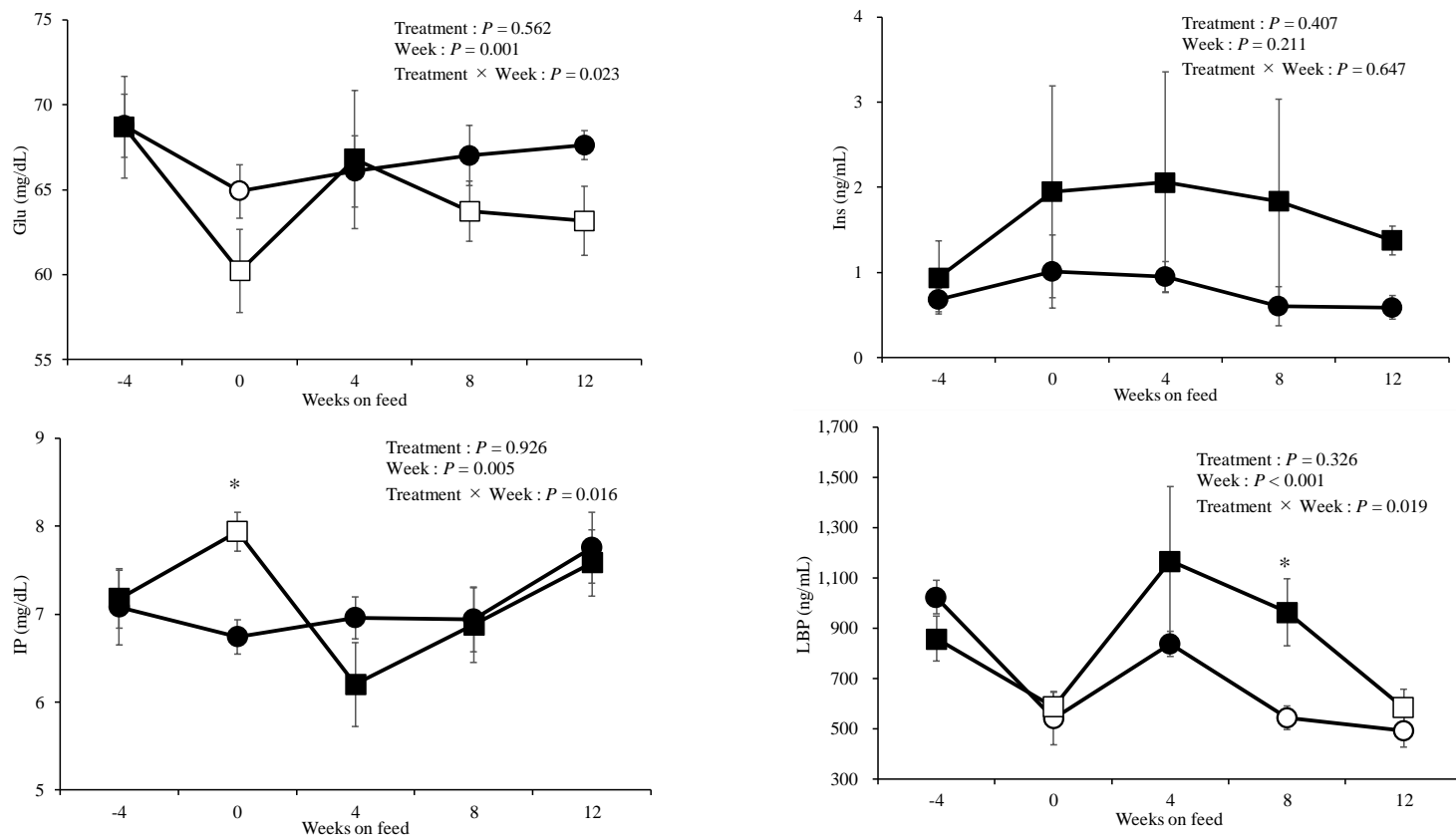


Fig. 4.3 Changes in the plasma concentration of glucose (Glu), insulin (Ins), inorganic phosphorus (IP), and lipopolysaccharide binding protein (LBP) in the control group (circles) and the KP group (squares) during the experimental period. The values are presented as mean \pm SE. White symbols indicate that the value is significant compared with that at week -4 ($P < 0.05$). The data pertaining to one of the steers in the KP group was excluded due to illness at weeks 4 and 12. *The values are different from that of the control group steers at $P < 0.05$.

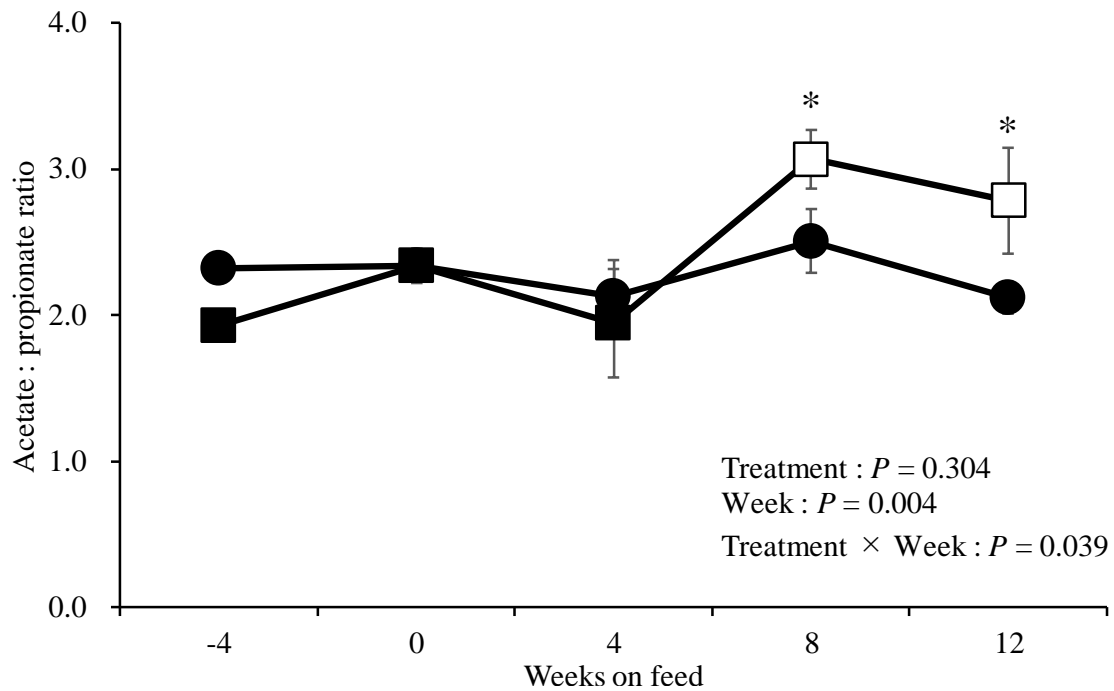


Fig. 4.4 Changes in the acetate to propionate ratio in the rumen fluid in the control group (circles) and the KP group (squares) during the experimental period. The values are presented as mean \pm SE. White symbols indicate that the value is significant compared with that at week -4 ($P < 0.05$). Data pertaining to one of the steers in the KP group was excluded due to illness in weeks 4 and 12. *The values are different from that of the control group steers at $P < 0.05$.

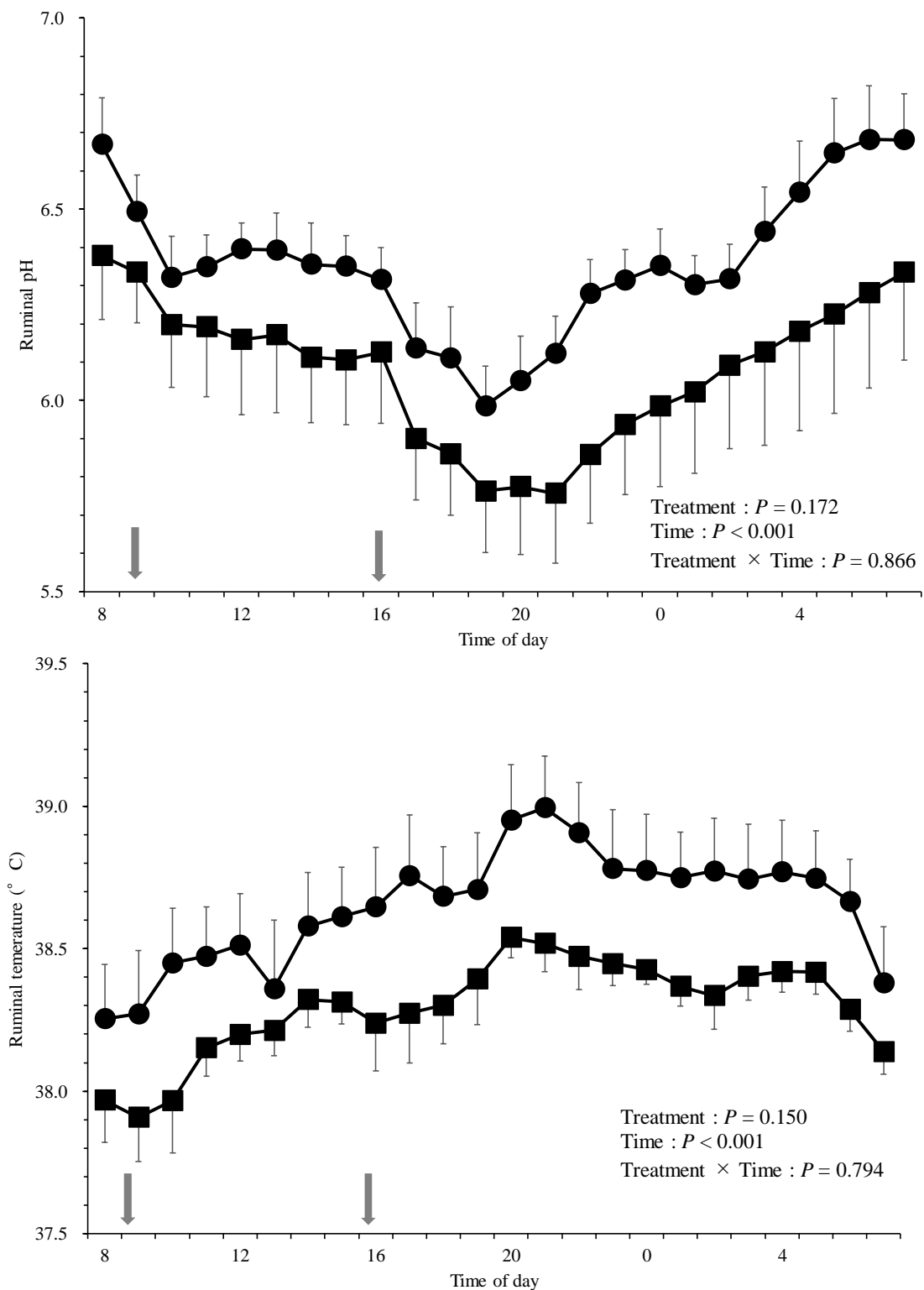


Fig. 4.5 Diurnal changes in the ruminal pH and temperature of the Japanese Black fattening steers in the control group (circles) and the KP group (squares). The values are presented as mean \pm SE. Arrow: feed time. The data pertaining to one of the steers in the KP group was excluded due to illness.

Table 4.1 Ingredients and nutritional composition of the experimental diet

Item	Concentrate feed		Roughage
	Control	10% KP	
Ingredient (% of DM)			
Commercial formula feed ¹	100.0	89.5	-
KP	-	10.0	-
Urea	-	0.5	-
Rice straw	-	-	100.0
Nutritional composition			
DM (%)	87.5	88.5	86.0
OM (% of DM)	96.8	97.2	80.8
CP (% of DM)	13.9	13.9	4.5
EE (% of DM)	3.2	2.8	1.4
aNDFom (% of DM)	18.0	24.4	63.9
Starch (% of DM)	53.2	49.2	5.2
TDN ² (% of DM)	86.4	86.2	42.9

KP, kraft pulp; DM, dry matter; OM, organic matter; CP, crude protein; EE, ether extract; aNDFom, α -Amilase-treated ash-free neutral detergent fiber; TDN, total digestible nutrients.

¹Miyazaki shimofuri tokugou shiageyou, Minami nihon kumiai siryo.

²Calculated value.

Table 4.2 Effect of feeding kraft pulp (KP) on the growth performance of Japanese Black fattening steers

Item	Control group (n = 5)	KP group (n = 5)	SE	<i>P</i> -value
Growth performance				
Initial weight (kg)	713.2	746.0	10.1	0.105
Final weight (kg)	788.4	806.4	17.1	0.479
DG (kg/day)	0.91	0.79	0.12	0.495
Feed intake ¹ (g/BW ^{0.75} /day)				
DM	59.1	55.0	2.0	0.180
TDN	49.9	45.2	1.3	0.063
Concentrate feed ratio ^{1,2} (%)	92.3	90.0	1.5	0.300
Feed efficiency ¹ (g/kg)				
DG/DM intake	104.5	96.8	7.6	0.642
DG/TDN intake	125.4	123.1	17.5	0.928

SE, Standard error; DG, daily gain; BW, body weight; DM, dry matter; TDN, total digestible nutrients.

¹The data pertaining to one of steers in the KP group was excluded due to illness.

²The ratio of concentrate feed to DM intake.

Table 4.3 Changes in the blood profile of the Japanese Black fattening steers in the control and KP group during the experimental period

Item	Group		SE	Weeks on feed					SE	P-value		
	Control (n = 5)	KP (n = 5)		-4	0	4 ¹	8	12 ¹		Treatment	Week	Treatment × week
TP (g/dL)	7.6	7.9	0.2	7.8	7.9	6.9	7.4	8.7	0.3	0.304	0.002	0.492
Alb (g/dL)	3.6	3.9	0.1	3.7	3.9	3.2	3.5	4.3	0.1	0.065	< 0.001	0.982
A/G ratio	0.95	0.99	0.05	0.94	1.01	0.98	0.92	0.99	0.05	0.548	0.177	0.466
T-Cho (mg/dL)	164.4	154.3	9.7	163.8	183.8	130.0	140.5	178.7	10.0	0.491	< 0.001	0.635
TG (mg/dL)	12.3	10.8	1.2	11.7	11.3	11.1	10.2	13.4	1.2	0.462	0.179	0.114
AST (U/L)	68.8	71.6	4.5	70.3	71.1	61.4	67.3	80.7	5.1	0.673	0.096	0.552
BUN (mg/dL)	12.0	13.6	0.7	11.6	13.3	11.7	11.8	15.6	0.8	0.151	0.002	0.658
Glu (mg/dL)	66.9	64.5	2.3	68.7	62.6	66.4	65.4	65.4	1.6	0.434	< 0.001	0.044
Ins (ng/mL)	0.77	1.63	0.70	0.81	1.48	1.51	1.22	0.98	0.54	0.407	0.211	0.647
GH (ng/mL)	2.46	2.69	0.22	3.04	2.44	2.55	2.42	2.43	0.30	0.490	0.487	0.221
T-KB (mg/dL)	397.3	372.5	25.0	339.1	381.3	376.7	431.2	396.2	26.8	0.504	0.079	0.898
IP (mg/dL)	7.1	7.2	0.7	7.1	7.3	6.6	6.9	7.7	0.3	0.867	0.022	0.045
Ca (mg/dL)	10.5	11.1	0.2	10.7	11.0	9.6	10.5	12.3	0.3	0.142	< 0.001	0.337
VA (IU/dL)	55.1	50.5	3.0	44.2	47.7	59.0	56.6	56.7	5.0	0.295	0.146	0.491
LBP (ng/mL)	687.1	789.1	177.6	940.6	562.7	894.5	753.7	539.0	71.1	0.326	< 0.001	0.019
SAA (µg/mL)	19.83	18.73	4.14	33.52	13.54	30.37	9.67	9.32	4.43	0.856	< 0.001	0.649
Hp (µg/mL)	1.97	7.07	3.17	7.50	0.96	9.06	0.94	4.14	3.16	0.288	0.087	0.220

SE, Standard error; TP, total protein; Alb, albumin; A/G, albumin/globulin; T-Cho, total cholesterol; TG, triglycerides; AST, aspartate transaminase; BUN, blood urea nitrogen; Glu, glucose; Ins, insulin; GH, growth hormone; T-KB, total ketone bodies; IP, inorganic phosphorus; Ca, calcium; VA, vitamin A; LBP, lipopolysaccharide binding protein; SAA, serum amyloid A; Hp, haptoglobin.

¹The data pertaining to one of steers in the KP group was excluded due to illness.

Table 4.4 Changes in the ruminal profile of the Japanese Black fattening steers in the control and KP group during the experimental period

Item	Group		SE	Weeks on feed					SE	<i>P</i> -value		
	Control (n = 5)	KP (n = 5)		-4	0	4 ¹	8	12 ¹		Treatment	Week	Treatment × week
Total VFA (mmol/L)	88.9	91.1	2.8	94.3	81.5	99.6	94.9	79.7	3.8	0.603	0.001	0.997
Composition (%)												
Acetic acid	54.8	55.4	0.7	54.6	55.1	53.3	58.7	53.7	1.1	0.545	0.009	0.258
Propionic acid	24.5	24.4	0.8	26.1	23.7	28.0	21.6	22.8	1.3	0.969	0.009	0.119
Butyric acid	16.2	15.9	0.7	15.9	16.8	13.8	15.1	18.6	1.0	0.790	0.031	0.460
Acetic : Propionic ratio	2.3	2.4	0.1	2.1	2.3	2.0	2.8	2.5	0.1	0.304	0.004	0.039
ammonia-nitrogen (mg/dL)	5.6	5.8	1.1	4.2	4.2	6.2	6.4	7.4	1.1	0.851	0.108	0.964
LPS ²												
log ₁₀ EU/mL	4.89	4.71	0.08	4.87	4.58	5.16	4.77	4.61	0.10	0.155	0.001	0.163
(EU/mL)	(77,814.5)	(50,786.4)		(74,418.1)	(38,051.6)	(146,919.6)	(58,524.7)	(40,322.6)				

SE, Standard error; VFA, Volatile fatty acid.

¹The data pertaining to one of steers in the KP group was excluded due to illness.

²Lipopolysaccharide.

Table 4.5 Effect of feeding kraft pulp (KP) on nutrient digestibility in Japanese Black fattening steers

Item	Control group (n = 5)	KP group (n = 5)	SE	<i>P</i> -value
Feed intake (kg/day)				
DM	8.9	7.7	0.6	0.220
Feed intake (g/BW ^{0.75} /day)				
DM	62.3	53.1	4.0	0.143
CP	8.2	6.8	0.6	0.143
TDN	51.3	44.6	3.1	0.167
Concentrate feed ratio ¹ (%)	92.3	90.0	1.5	0.300
Digestibility (%)				
DM	81.2	83.5	1.4	0.270
OM	83.0	85.4	1.3	0.238
CP	73.9	76.6	1.8	0.310
EE	77.6	80.5	1.9	0.316
aNDFom	66.6	71.3	3.9	0.410
NFC	92.0	94.9	1.3	0.158
Starch	97.5	98.9	0.7	0.191

SE, Standard error; DM, dry matter; BW, body weight; CP, crude protein; TDN, total digestible nutrients; OM, organic matter; EE, ether extract; aNDFom, α -Amilas- treated ash-free neutral detergent fiber; NFC, non-fibrous carbohydrate.

¹The ratio of concentrate feed to dry matter intake.

Table 4.6 Effect of feeding kraft pulp (KP) on nitrogen balance in Japanese Black fattening steers

Item	Control group (n = 5)	KP group (n = 5)	SE	<i>P</i> -value
Ratio of nitrogen intake (%)				
Feces N excretion	26.1	23.4	1.8	0.310
Urine N excretion	31.3	34.1	5.1	0.711
N retention	42.6	42.5	5.1	0.994

SE, Standard error.

第 5 章 総括

近年、地球規模の気候変動による気温の上昇がわが国においても問題となっている。日本の平均気温は約 100 年で 1.1°C 上昇しており（気象庁 2018）、21 世紀末はさらなる気温の上昇と真夏日および猛暑日の増加が予測されている（気象庁 2017）。

暑熱環境は家畜の生産性を低下させる要因として、従来から認識されてきた。家畜の生産性には多くの環境要因が関連しているが、特に暑熱環境は家畜の恒温性に直接作用するため（三村と森田 1980）、生産性への影響も大きい。したがって、今後予測されている温暖化により、わが国では、暑熱が家畜の生産性に影響する範囲が拡大するとともに家畜の生産性や生産物品質の低下が生じるリスクが増大する（野中ら 2009）。

西南暖地に位置する宮崎県は、温暖な気候を背景に農畜産業が盛んである。平成 28 年の農業産出額は全国 5 位の 3,562 億円であり、そのうち畜産は 62% を占めている（宮崎県 2018）。宮崎県でも温暖化は例外では無く（Fig.5.1）、近年は畜産業への影響も懸念されている。現在のところ、県内の気温上昇による家畜の生産性への影響を如実に示す情報はみられない。しかし、県内の真夏日の日数と牛の熱射病患畜頭数および死廃頭数との関係を見ると、日数の変動にほぼ付随して熱射病関連の頭数も変動していることがわかる（Fig.5.2）。これらのことから、今後家畜は暑熱環境に曝されるリスクが高まり、県畜産業のみならず経済的にも多大な損失をもたらす可能性が考えられる。これは、宮崎県だけではなく日本全国に共通する問題である。

暑熱環境が家畜の生産性に及ぼす影響として、乳用牛では飼料摂取量および泌乳量の減少（West 2003）や、繁殖性の低下（De Rensis と

Scaramuzzi 2003) が報告されている。そして、外国種の肉用牛では、飼料摂取量の減少 (Brown-Brandle ら 2005; Mader ら 2006; Arias と Mader 2011) や発育の鈍化 (Brown-Brandle ら 2005) も報告されている。しかし、わが国肉用牛の主要な品種である黒毛和種の肥育牛に関する知見は見当たらない。

黒毛和種去勢牛の肥育は、9 カ月齢から 29 カ月齢までの 20 カ月間が一般的であり (農林水産省 2015), 肥育期間中は濃厚飼料を多給する。しかし、濃厚飼料の多量摂取は第一胃発酵の恒常性を阻害する (Owens ら 1998)。また、肥育中期に該当する 16 から 22 カ月齢では脂肪交雑の増加を目的に VA 給与を制限するが、血中 VA 濃度の過度な低下は飼料摂取量の減少 (甫立ら 2004) と、発育の鈍化 (Oka ら 1998b) を招く。加えて、肥育の進行により脂肪が蓄積されると飼料効率は低下する (三津本ら 1989)。よって、黒毛和種の肥育は栄養管理面において生産性が低下しやすい体系である。このような体系に暑熱の影響が加わることで生産性低下のリスクがさらに高まると考えられる。実際、黒毛和種の肥育は前述のとおり 20 カ月間であり、肥育牛は必ず暑熱期を経験する。そのため、暑熱が黒毛和種肥育牛の生産性に及ぼす影響を明らかにするとともに、暑熱対策を検討することは喫緊の課題と考える。

そこで本研究では、まず第 2 章 1 節で黒毛和種去勢肥育牛 63 頭の飼養成績データを用いて暑熱による生産性への影響を肥育ステージごとに解析した。その結果、肥育前期および肥育後期では暑熱の影響による飼料摂取量、DG、および飼料効率の減少が認められた。しかし、肥育中期においては、飼料摂取量は暑熱期に増加し、DG および飼料効率は暑熱による影響はみられず、肥育前期や後期とは異なった。肥育中

期では、血中 VA 濃度の減少が血中 IGF-I および T_3 濃度の減少を引き起こし、発育鈍化につながるということが明らかにされている (Oka ら 1998a)。そのため、肥育中期が他の肥育ステージと異なる結果が示された要因の 1 つには、VA 給与の制限が考えられた。また、肥育前期では、暑熱期に飼料摂取量が減少しても濃厚飼料を選択的に摂取することで TDN 摂取量は増加した。一方肥育後期では、暑熱期に飼料摂取量が減少し濃厚飼料摂取が増加することは肥育前期と共通していたが、TDN 摂取量は減少していた。このことは、肥育後期は肥育前期に比べて体重当たりの体表面積が小さく脂肪蓄積量が多いため、熱放散の効率が低いことが影響していると考えられる。つまり、暑熱環境下における肥育後期の黒毛和種は飼料摂取に伴い発生する熱を効率よく放熱できず体温が上昇するため、飼料摂取量の減少が顕著となり TDN 摂取量も減少したと考えられた。

次に 2 節では、暑熱が黒毛和種肥育牛の飼料消化性に及ぼす影響を検討した。なお、調査ステージは 1 節において暑熱の影響が最も顕著であった肥育後期とした。その結果、黒毛和種肥育牛は暑熱により飼料消化率が低下することが明らかになり、このことには濃厚飼料多給による第一胃内発酵への影響が関連することが推察された。

第 2 章の結果から、暑熱環境が黒毛和種肥育牛の生産性に及ぼす影響は肥育ステージによって異なることが明らかになり、黒毛和種肥育牛への暑熱対策は肥育ステージごとに検討する必要性が示唆された。暑熱期における反芻家畜は、第一胃運動の低下により飼料片の消化管内滞留時間が延長するため飼料消化率は増加する (Warren ら 1974 ; 平山ら 2002)。しかし、濃厚飼料の給与割合が極めて高い肥育後期の黒毛和種では、暑熱環境下においても飼料消化率は増加しない、もし

くは減少することが解った。よって、肥育後期の黒毛和種では、暑熱期における飼料消化性を改善することが生産性向上の鍵になると考えられた。そこで、第3章と第4章では肥育後期の暑熱期に重点をおき、黒毛和種肥育牛への栄養管理による暑熱対策が飼料消化性に及ぼす効果を中心に検討した。

まず第3章では、飼料の給与量を制限し、代謝熱および維持エネルギーを低減させることによる暑熱期における黒毛和種肥育牛の飼料消化性への効果を検討した。飼料給与量は、肥育中期以降 DG0.75 kg に必要な TDN 要求量を満たす量に制限し、飼料の粗濃比は 1:9 とした。その結果、制限給与は肥育後期の暑熱期において飼料消化率、特に CP 消化率の減少を抑制し窒素利用性を改善した。制限給与は飽食に比べて、飼料摂取量と摂取飼料の粗濃比が安定的に推移していた。一方で、給与エネルギーの制限による効果は、血中 T₃ 濃度の低下による維持エネルギーの減少と関連する (Pethes ら 1985; Murphy と Loerch 1994)。しかし、本研究において血中 T₃ 濃度は VA 給与制限の影響を強く受け、全ての供試牛で肥育の経過に伴い減少していた。そのため、肥育後期の暑熱期における制限給与の効果は、飼料摂取量や摂取飼料の粗濃比を安定的に維持することにより得られた可能性が考えられた。また、制限給与は飽食に比べて枝肉成績は遜色なく、飼料効率が高まった。制限給与は飼料の削減にもつながり、飽食に比べて代謝体重当たりの飼料摂取量は 5%程度減少していた (飽食区 vs. 制限区 = 79.56 g/BW^{0.75}/日 vs. 76.25 g/BW^{0.75}/日; $P = 0.053$)。両区の試験期間中における1頭当たりの飼料費は、飽食区で 268,928 円、制限区で 258,150 円であり、制限区は飽食区に比べて 10,778 円少なかった。平成 28 年度の去勢若齢肥育牛 1 頭当たりの生産費のうち、飼料費は 26.9 % と高い割

合を占めており（農林水産省 2018）、肥育経営を圧迫している。以上のことから、制限給与は肥育後期の暑熱対策として、また、肥育経営の安定に寄与する飼養管理として有望であることが示唆された。しかし、本研究で設定した制限レベルでは、肥育後期における濃厚飼料摂取量は飽食とほぼ同等となることが示された。そのため制限給与体系で、肥育後期の暑熱期において黒毛和種肥育牛の易発酵性炭水化物の摂取を抑制し、消化性に優れた繊維成分を給与することで、飼料消化性をさらに改善できる可能性が考えられた。

そこで第 4 章では、制限給与体系の肥育後期の暑熱期において、黒毛和種肥育牛へ濃厚飼料の DM 比 10%を繊維質飼料である KP に代替給与した場合の飼料消化性および第一胃発酵に及ぼす影響について検討した。その結果、有意な差では無かったものの、調査した全ての成分消化率は KP 無給与よりも KP 給与で高値を示し、特に aNDFom の消化率は 4.7%高まっていた。このことは、KP 給与により摂取飼料のデンプン割合が有意に減少し（対照区 vs. KP 区 = 48.8 % vs. 45.9 %; $P = 0.035$ ）、デンプン減退による繊維成分消化率の低下を抑制したためと考えられた。また、泌乳牛では、KP の給与により胃液 pH の上昇と胃液 LPS 活性の減少が認められている（Nishimura ら 印刷中）。しかし、本研究では KP を給与しても同項目への影響は認められなかった。この要因の 1 つは、濃厚飼料の給与割合が関係していると考えられる。Nishimura ら（印刷中）の研究では、給与した TMR の粗濃比は 4 : 6、濃厚飼料の KP 代替率は DM 比で約 20%であった。このため、肥育後期のような濃厚飼料の給与割合が極めて高い飼養では、濃厚飼料の 10%を KP に代替しても第一胃発酵に対する効果は弱いと推察された。KP は暑熱期の飼料として有望であると考えられたが、今後 KP の給与

割合を増加させた場合の影響を検討する必要がある。さらに、肥育後期に比べて濃厚飼料給与割合が低い肥育前期や濃厚飼料の給与量の変動する肥育中期において、KP 給与の効果を検討する必要もある。

本研究の解析で、暑熱による黒毛和種肥育牛の生産性への影響は肥育ステージごとに異なっていた (Table 5.1)。また、制限給与は安定的な飼料摂取を促すことにより、暑熱期の飼料消化率や窒素利用性の低下を抑制した。そして、KP 給与は良質な繊維成分供給により暑熱期のデンプン減退の作用を抑制し、本研究では有意な変化ではなかったものの、繊維成分消化率が高まった。したがって、各肥育ステージの飼養特性、暑熱の影響、および暑熱対策の特徴を考慮すれば、本研究で検討した暑熱対策を肥育前期と肥育中期にも応用可能と考える。

Table 5.2 に、想定される暑熱対策の有効性を肥育ステージごとにまとめた。肥育前期は、暑熱期に飼料摂取量と CP 摂取量が減少したが、逆に TDN 摂取量は増加していた (Table 5.1)。これは、肥育牛が暑熱期において粗飼料摂取を減らし濃厚飼料を積極的に摂取した結果である。なお、本研究では肥育前期の粗飼料に CP 含量の高いチモシー乾草とアルファルファヘイキューブを給与しており、粗飼料の摂取が減ったことで CP 摂取量も減少したと考えられた。そして、暑熱により DG および飼料効率も減少していた。このため、肥育前期の暑熱期では粗飼料摂取が減少しないような飼養管理が望ましい。また、暑熱期に給与する粗飼料は、第一胃発酵熱抑制の観点から、繊維消化性の高い粗飼料の利用が推奨されている (独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 2009)。したがって、粗飼料の一部代替として KP を給与する対策が有効ではないかと考えられる。ただし、KP には CP が含まれないため、CP 摂取が不足しないように留意する必要がある。一方、肥育

前期における TDN 摂取の減少は筋肉と骨の生育を抑制し、肥育期間中の増体を鈍化させる（三橋ら 1997）。よって、制限給与は肥育前期には適さないと考えられる。本研究の解析では、肥育中期における暑熱の影響は不明瞭であった（Table 5.1）。おそらく、VA 給与制限が関係していると考えられる。しかし、肥育中期は肥育後期と同様に濃厚飼料多給の飼養であることから、暑熱期には飼料消化性への影響が懸念される。そのため、制限給与と KP 給与の組み合わせによる対策が有効ではないかと考えられた。しかし、制限給与は肥育中期から肥育終了時まで長期間継続する必要があるため、暑熱期のみの対策として取り入れることは難しい。暑熱期のみの対策としては、濃厚飼料の一部代替として KP を給与する対策が有効と考える。

以上、本研究では黒毛和種肥育牛に対する暑熱の影響を明らかにし、暑熱の影響が最も大きい肥育後期の黒毛和種肥育牛への栄養管理による暑熱対策技術を提示した。これらのことは黒毛和種肥育牛の暑熱対策に関する基礎的な知見として有用であり、黒毛和種肥育牛の生産性向上に寄与するものと考えられる。

今後は肥育後期以外の肥育ステージにおける暑熱対策を検討することや、本研究で検討した栄養管理による暑熱対策とミスト噴霧や送風機の利用といった畜舎環境の制御による暑熱対策を組み合わせ活用することについて検討する必要がある。これにより、黒毛和種肥育牛の暑熱期の生産性向上はもとより、経営の安定化につながる。

図表

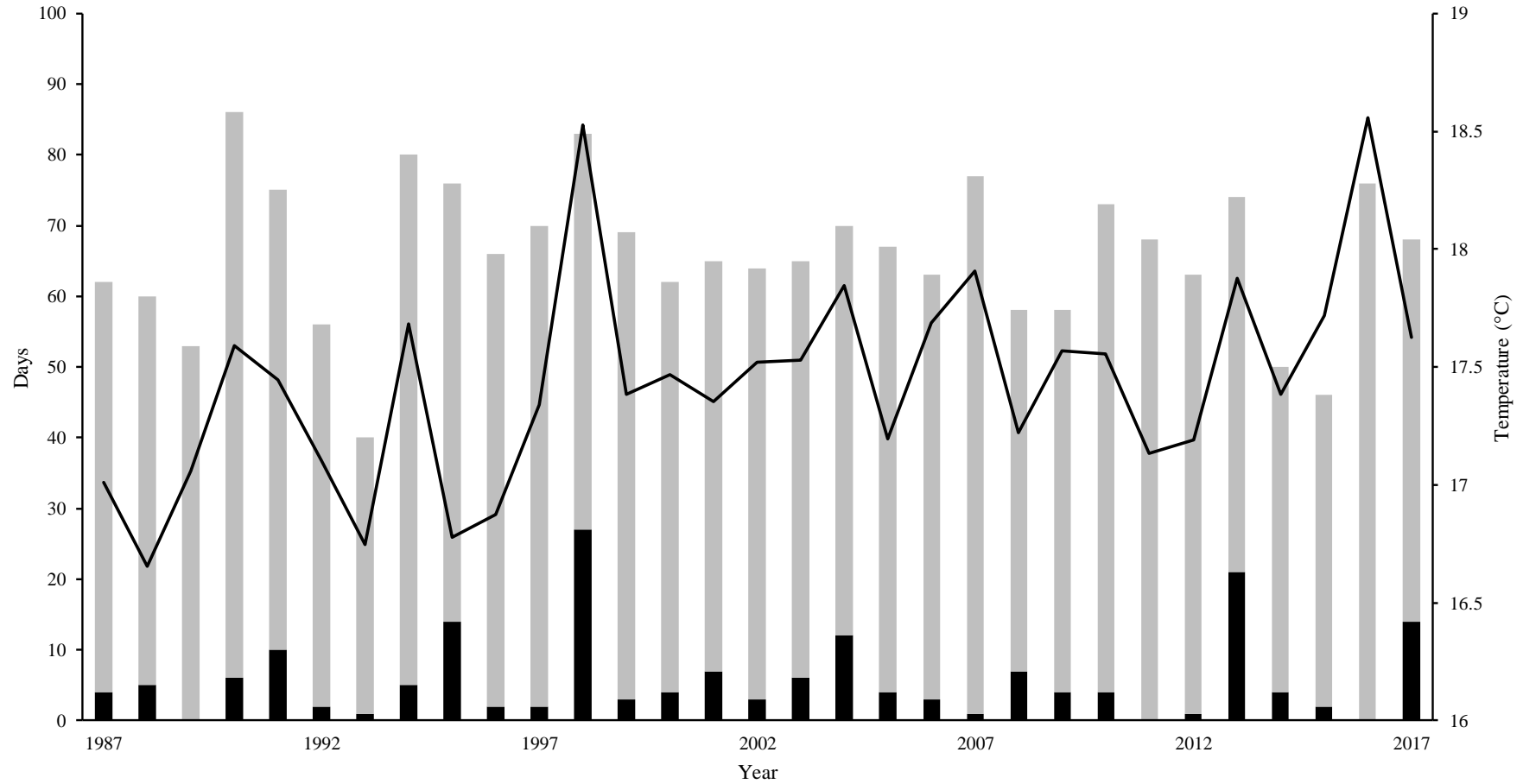


Fig. 5.1 Average temperature (black line), the number of hot days with temperature exceeding 30°C (gray + black square) and the number of extremely hot days with temperature exceeding 35°C (black square) in Miyazaki Prefecture. Calculated and illustrated using the data of MLITT Japan Meteorological Bureau.

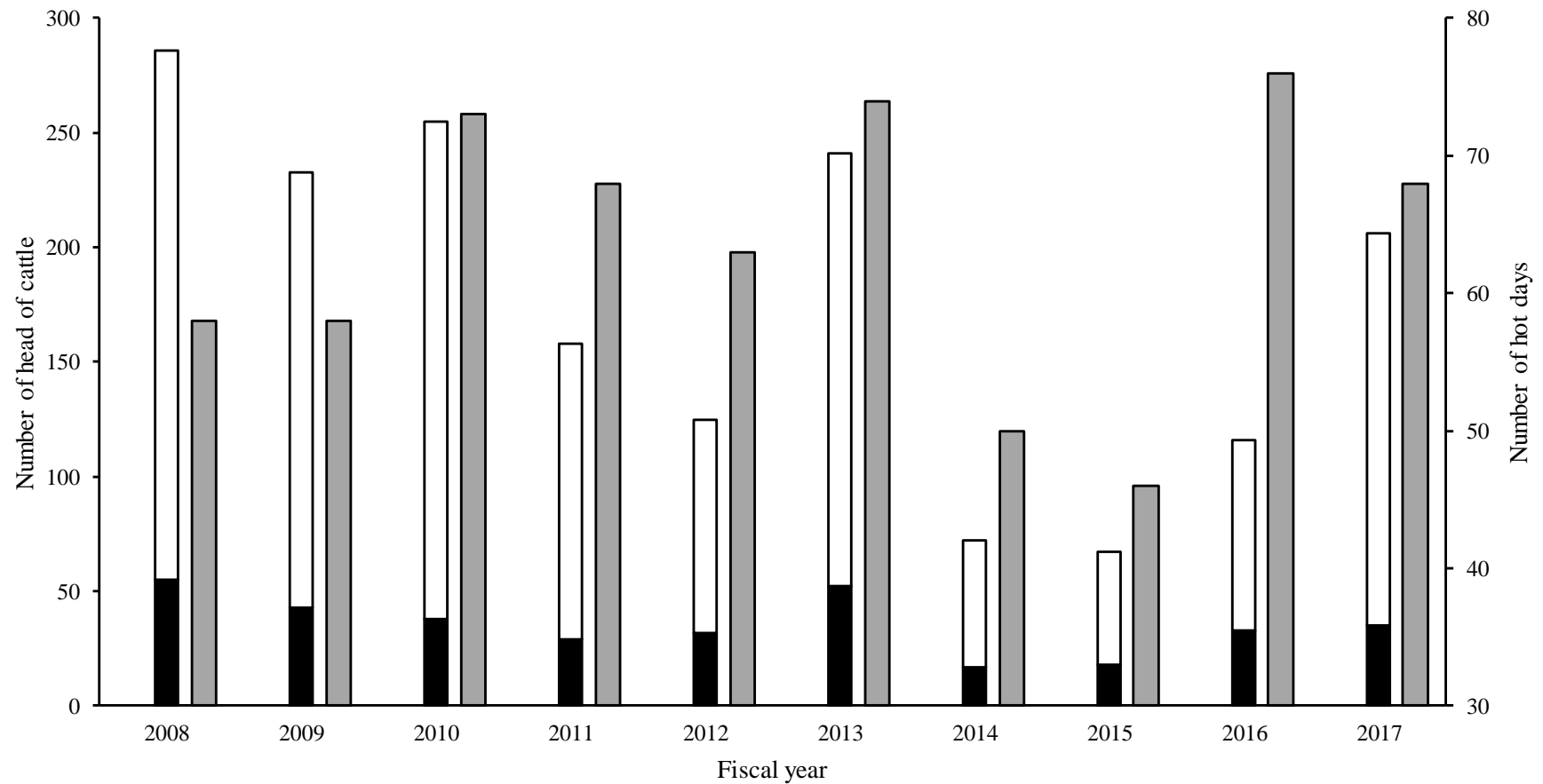


Fig. 5.2 Relationship between number of hot days (gray square) with temperature exceeding 30°C and number of cases of heatstroke (white square) and deaths (black square) among cattle in Miyazaki Prefecture. Calculated and illustrated using the data of MLITT Japan Meteorological Bureau and the Mutual aid business result report (from fiscal year 2008 to 2017) of Miyazaki Agricultural Mutual Benefit Association.

Table 5.1 Effect of hot environment on the feed intake, growth performance feed digestibility, and ruminal profile of Japanese Black steers at each fattening stages

Parameter	Stages of fattening		
	Early period	Middle period	Late period
Nutrient intake			
Feed intake	▼	▲	▼
CP	▼	▲	▼
TDN	▲	▲	▼
Growth performance			
DG	▼	×	▼
Feed efficiency	▼	×	▼
Blood			
A/G ratio	▼	×	×
T-cho	▼	▼	▼
BUN	▼	×	▼
VA	×	×	▲
Feed digestibility			
▼			
Nitrogen balance			
Feces N excretion	-	-	▲
Urine N excretion	-	-	▲
N retention	-	-	▼
Ruminal profile			
Total VFA	-	-	×
Acetic acid	-	-	▲
Propionic acid	-	-	×
Butyric acid	-	-	▼
A/P ratio	-	-	×
ammonia-nitrogen	-	-	×

▲, higher than moderate season; ▼, lower than moderate season; ×, no effect; -, unmeasurement.

Table 5.2 Effectiveness of hot environment countermeasures for Japanese Black fattening cattle

Stages of fattening	Treatment		
	Restricted feeding	KP	Restricted feeding + KP
Early period	×	○	×
Middle period	○	○	○
Late period	○	○	○

○, good; ×, not good.

A study on the nutritional metabolism and its control in Japanese Black fattening steers in a hot environment

Yuka Maeda

Summary

Rising temperatures due to global climate change have been a matter of concern worldwide. According to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, the global average surface temperature increased by 0.85 °C within 100 years, and this trend is expected to continue until the end of the 21st century. This effect was also observed in Japan. It has been known since a long time that hot summers adversely affect animal production. Environmental temperature directly affects homeostasis in animals; thus, it has a substantial impact on livestock production. It is, therefore, likely that the risk of livestock being exposed to heat will increase every year, which will reduce overall productivity. In dairy cattle, hot environments are typically associated with decreased feed intake, milk production, and fertility. In general, beef cattle seem to be more resistant to heat than dairy cattle; however, decreased feed intake and growth have also been observed in heat-stressed beef cattle. The effect of hot environments on the productivity of Japanese Black fattening cattle remains unclear.

The present study first investigated the effect of the hot environment

on feed intake, feed efficiency, and digestibility in Japanese Black fattening steers. The results showed that the hot environment reduced the feeding performance of steers during early and late fattening stages, and reduced feed digestibility during the late fattening stage. The effects of the hot environment on feeding performance during the middle fattening stage differed from those during the early and late fattening stages. Generally, Japanese Black fattening cattle in the middle fattening stage are fed diets containing low vitamin A levels to increase fat marbling. However, low plasma vitamin A levels reduce dry matter intake and daily body weight gain. Therefore, the observed differences in the effect of the hot environment on the middle and other fattening stages is likely due to low plasma vitamin A levels in the middle fattening stage. These results suggest that the effect of the hot environment on the productivity of Japanese Black fattening cattle differs between fattening stages. However, improving digestibility is important to increase the feeding performance of Japanese Black steers in the late fattening stage.

The effect of restricted feeding on feed digestibility and growth performance was examined in order to improve feed digestibility in Japanese Black fattening steer during the hot season in the late fattening stage. Feed was provided at an amount of 110% of the requirements of total digestible nutrients, according to the Japanese Feeding Standard for fattening steers, and a daily weight gain of 0.75 kg was expected. As a result, restricted feeding reduced the adverse effects of the hot environment on feed digestibility, especially crude protein digestibility and nitrogen retention. Moreover, feed intake and the proportion of concentrate feed remained stable due to restricted feeding.

Furthermore, to enhance the effect of restricted feeding on feed digestibility of steers, we investigated the effect of using wood kraft pulp (KP) as a replacement concentrate on feed digestibility and rumen properties of Japanese Black fattening steers. As a result, overall feed digestibility, especially fiber digestibility, was higher in steers fed the KP diet than in the controls. Increased fiber digestibility could be attributed to the decreased proportion of starch in the diet. These results suggest that KP is a suitable substitute for concentrate feed in Japanese Black fattening cattle during hot season.

These studies showed that the effect of a hot environment on Japanese Black fattening cattle productivity and potential measures to alleviate heat stress by nutrition management. These novel insights may contribute to the improvement of Japanese Black fattening cattle productivity.

引用文献

- Adachi K, Kawano H, Tsuno K, Nomura Y, Yamamoto N, Arikawa A, et al. Relationship between serum biochemical values and marbling scores in Japanese black steers. *Journal of Veterinary Medical Science* 61, 961-964.
- Arias RA, Mader TL. 2011. Environmental factors affecting daily water intake on cattle finished in feedlots. *Journal of Animal Science* 89, 245-251.
- Association of official analytical chemists (AOAC). 2005. AOAC official method 2002.04. Official methods of analysis of AOAC international, 18th edn. AOAC International, Maryland.
- Baker AJ. 1973. Effect of lignin on the in vitro digestibility of wood pulp. *Journal of Animal Science* 36, 768-771.
- Brosh A, Aharoni Y, Degen AA, Wright D, Young BA. 1998. Effects of solar radiation, dietary energy, and time of feeding on thermoregulatory responses and energy balance in cattle in a hot environment. *Journal of Animal Science* 76, 2671-2677.
- Brown-Brandl TM, Eigenberg RA, Hahn GL, Nienaber JA, Mader TL, Spiers DE, Parkhurst AM. 2005. Analyses of thermoregulatory responses of feeder cattle exposed to simulated heat waves. *International Journal of Biometeorology* 49, 285-296.
- Clarke SD, Dyer IA. 1973. Chemically degraded wood in finishing beef cattle rations. *Journal of Animal Science* 37, 1022-1026.
- Davis MS, Mader TL, Holt SM, Parkhurst AM. 2003. Strategies to reduce feedlot cattle heat stress: Effects on tympanic temperature. *Journal of Animal Science*, 81, 649-661.

- De Rensis F, Scaramuzzi RJ. 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow—a review. *Theriogenology*, 60, 1139-1151.
- 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（2008年度版）. 中央畜産会，東京.
- 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構（編）. 2010. 日本標準試料成分表（2009年度版）. 中央畜産会，東京.
- 永西修. 2002. 稲わらの飼料としての再評価：わら類の有効活用とその展望. 日本草地学会誌, 48, 371-378.
- Finch VA. 1986. Body temperature in beef cattle: its control and relevance to production in the tropics. *Journal of Animal Science*, 62, 531-542.
- Fox DG, Johnson RR, Preston RL, Dockerty TR, Klosterman EW. 1972. Protein and energy utilization during compensatory growth in beef cattle. *Journal of Animal Science* 34, 310-318.
- Fuquay JW. 1981. Heat Stress as it Affects Animal Production 1. *Journal of Animal Science*, 52, 164-174.
- Gaughan JB, Mader TL, Savage D, Young BA. 1996. Effect of feeding regime on feed intake of cattle exposed to heat. *Proceedings-Australian Society of Animal Production* 21, 223-226.
- Gozho GN, Krause DO, Plaizier JC. 2006. Ruminal lipopolysaccharide and inflammation during grain adaptation and subacute ruminal acidosis in steers. *Journal of Dairy Science* 89, 4404-4413.
- Gozho GN, Plaizier JC, Krause DO, Kennedy AD, Wittenberg KM. 2005. Subacute ruminal acidosis induces ruminal lipopolysaccharide endotoxin release and triggers an inflammatory response. *Journal of Dairy Science* 88, 1399-1403.

Hada M, Yashro J, Machida M, Kajikawa H. 2016. Ruminant feed. Japanese Patent No.5994964, granted 2 September 2016.

萩原茂紀，元井菫子，飯塚三喜．1978．乳牛における血液の理化学的性状調査．家畜衛生試験場研究報告 76，30-42．

Hales KE, Brown-Brandl TM, Freetly HC. 2014. Effects of decreased dietary roughage concentration on energy metabolism and nutrient balance in finishing beef cattle. *Journal of Animal Science* 92, 264-271.

早坂貴代史，宮谷内留行，宮本進，荒井輝男，鷹取雅仁，田中慧，佐々木仁雄，三浦祐輔．1988．夏と冬における混合飼料給与による高泌乳牛（泌乳前期）の乾物・養分摂取量とみかけの消化率．日本畜産学会報 59，763-772．

早坂貴代史，山岸規昭．1990．北海道における舎内気温の上昇に対する泌乳牛の行動反応．日本畜産学会報 61，690-694．

Hicks RB, Owens FN, Gill DR, Martin JJ, Strasia CA. 1990. Effect of controlled feed intake on performance and carcass characteristics of feedlot steers and heifers. *Journal of Animal Science* 68, 233-244.

Hirabayashi H, Kawashima K, Okimura T, Tateno A, Suzuki A, Asakuma S, Isobe N, Obitsu T, Sugino T, Kushibiki S. 2017. Effect of nutrient levels during the far-off period on postpartum productivity in dairy cows. *Animal Science Journal* 88, 1162-1170.

平山琢二，大城政一，加藤和雄，太田寛．2000．暑熱暴露がヤギの消化管通過速度と第一胃収縮運動に与える影響．日本畜産学会報 71，J258-J263．

甫立京子，宮重俊一，東山由美，谷口稔明，宮崎茂，宮本享，甫立孝一．2004．黒毛和種去勢牛のビタミン A 欠乏時の栄養状態と筋肉水

- 腫との関係. 日本獣医師会誌 57, 371-376.
- Hornick JL, Van Eenaeme C, Clinquart A, Diez M, Istasse L. 1998. Different periods of feed restriction before compensatory growth in Belgian Blue bulls: I. animal performance, nitrogen balance, meat characteristics, and fat composition. *Journal of Animal Science* 76, 249-259.
- 生田健太郎, 岡田啓司, 佐藤繁, 安田準. 2010. 暑熱が泌乳牛の血液成分値に及ぼす影響. 産業動物臨床医学雑誌 1, 190-196.
- 井上良. 2005. よくわかる肉牛の肥育技術 (改訂版). 肉牛新報社, 東京.
- 板橋久雄. 1996. 乳牛の生理機能とヒートストレス. In: ヒートストレス. 第1版. デーリィ・ジャパン社 (編集). pp. 7-20. デーリィ・ジャパン社, 東京.
- 自給飼料利用研究会 (編). 2009. 三訂版粗飼料の品質評価ガイドブック. 日本草地畜産種子協会, 東京.
- 梶川博, 寺田文典, 田野良衛, 岩崎和雄, 伊藤稔, 長沢定男, 富村洋一, 松田敏誉, 石井忠, 須藤賢一, 志水一允, 大山嘉信. 1987. 蒸煮解繊処理したシラカンバの給与がホルスタイン種去勢牛の飼料摂取量および増体量に及ぼす影響. 日本畜産学会報 58, 101-106.
- 神立誠, 須藤恒二. 1985. ルーメンの世界. 農文協, 東京.
- Kaneko J. 1983. 家畜臨床生化学. 第三版. 近代出版, 東京.
- 環境省. 2015. 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書 (AR5)等について. 環境省, 東京. [cited 17. August, 2018]. Available from URL : <http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/>
- Kelley RO, Martz FA, Johnson HD. 1967. Effect of environmental temperature on ruminal volatile fatty acid levels with controlled feed

- intake. *Journal of Dairy Science* 50, 531-533.
- Khafipour E, Krause DO, Plaizier JC. 2009a. A grain-based subacute ruminal acidosis challenge causes translocation of lipopolysaccharide and triggers inflammation. *Journal of Dairy Science* 92, 1060-1070.
- Khafipour E, Krause DO, Plaizier JC. 2009b. Alfalfa pellet-induced subacute ruminal acidosis in dairy cows increases bacterial endotoxin in the rumen without causing inflammation. *Journal of Dairy Science* 92, 1712-1724.
- 気象庁. 2016. 過去の気象データ・ダウンロード. 気象庁, 東京 ; [cited 2.April,2016]. Available from URL :<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 気象庁. 2017. 地球温暖化予測情報 第9巻. 気象庁, 東京. [cited 27. September, 2018]. Available from URL :<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/pdf/02.pdf>
- 気象庁. 2018. 日本の気候の変化. 気象庁, 東京. [cited 27. September, 2018]. Available from URL :http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p08.html
- 黒肥地一郎, 美濃貞治郎, 岩成寿, 滝本勇治, 犬童幸人. 1967. 肉用牛（褐毛和種）の飼料消化率におよぼす暑熱および消化酵素の影響. 九州農業試験場彙報 13, 1-20.
- Lee AJ, Twardock AR, Bubar RH, Hall JE, Davis CL. 1978. Blood metabolic profiles: their use and relation to nutritional status of dairy cows. *Journal of Dairy Science* 61, 1652-1670.
- Mader TL, Davis MS. 2004. Effect of management strategies on reducing heat stress of feedlot cattle: feed and water intake. *Journal of Animal Science* 82, 3077-3087.

- Mader TL, Davis MS, Brown-Brandl T. 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 84, 712-719.
- Mader TL, Holt SM, Hahn GL, Davis MS, Spiers DE. 2002. Feeding strategies for managing heat load in feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 80, 2373-2382.
- Millett MA, Baker AJ, Satter LD, McGovern JN, Dinius DA. 1973. Pulp and papermaking residues as feedstuffs for ruminants. *Journal of Animal Science* 37, 599-607.
- 三村耕，森田琢磨．1980．家畜管理学．養賢堂，東京．
- 三橋忠由，三津本充，小沢忍．1997．黒毛和種去勢牛の増体および枝肉形質に対する種雄牛，肥育前期粗飼料および肥育後期濃厚飼料の影響．日本畜産学会報 68, 403-413.
- 三津本充，小沢忍，三橋忠由，山下良弘．1989．黒毛和種去勢牛の枝肉形質に及ぼす仕上げ体重，種雄牛および肥育後期濃厚飼料の影響．日本畜産学会報 60, 351-358.
- 宮崎県．2018．宮崎の畜産．宮崎県畜産振興課，宮崎．
- 森下忠，瀧澤秀明，石井憲一，松井誠．2004．肉牛における稲わら代替粗飼料としてのイタリアンライグラスストローの検討．愛知県農業総合試験場研究報告 36, 69-74.
- 向居彰夫．1978．西南暖地における乳牛の飼養管理．農業施設 8, 31-42.
- 村元隆行，相川勝弘，柴田昌宏，中西直人．2002．肥育全期間における濃厚飼料の制限給与が黒毛和種去勢牛の産肉性に及ぼす影響．日本畜産学会報 73, 57-62.

- Murphy TA, Loerch SC. 1994. Effect of restricted feeding of growing steers on performance, carcass characteristics, and composition. *Journal of Animal Science* 72, 2497-2507.
- Nakamura Y, Orito H, Tsuneishi E, Hirano K, Kato N, Shoji A, et al. 2008. Changes in plasma composition of Japanese black steers during grazing and fattening periods. *Journal of Applied Animal Research* 34, 157-161.
- Nelson BD, Ellzey HD, Morgan EB, Allen M. 1968. Effect of feeding lactating cow varying forage to concentrate ratio. *Journal of Dairy Science* 51, 1796-1800.
- 西博巳, 坂下邦仁, 岡野良一, 米丸光政, 大園正陽, 堤知子, 川畑健次. 2001. バイオ双子牛を用いた低コスト肉用牛肥育試験 第1報 ビタミン A 制限による肥育技術の確立. 鹿児島県畜産試験場研究報告 34, 31-36.
- Nishimura K, Kurosu K, Terada F, Mizuguchi H, Sato S, Kushibiki S. in press. Effect of wood kraft pulp feed on digestibility, ruminal characteristics, and milk production performance in lactating daily cows. *Animal Science Journal*.
- 野中最子, 小林洋介, 樋口浩二, 永西修. 2009. 地球温暖化が日本における家畜の生産性に及ぼす影響評価の現状と課題. 地球環境 44, 215-222.
- 野中最子, 山崎信, 田鎖直澄, 樋口浩二, 永西修, 寺田文典, 栗原光規. 2010. わが国のホルスタイン種育成雌牛の夏季増体量に及ぼす温暖化の影響. 日本畜産学会報 81, 29-35.
- 農林水産省. 2015. 家畜改良増殖目標. 農林水産省, 東京. [cited 17.August,2018]. Available from URL :

http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kikaku/lin/l_hosin/pdf/h27_katiku_mokuhyo.pdf

農林水産省. 2018. 家畜改良増殖をめぐる情勢. 農林水産省, 東京.

[cited 17. August, 2018]. Available from URL :

www.maff.go.jp/j/chikusan/kikaku/lin/l_hosin/attach/pdf/index-115.pdf

NOSAI 連宮崎. 2009. 平成 20 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2010. 平成 21 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2011. 平成 22 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2012. 平成 23 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2013. 平成 24 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2014. 平成 25 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2015. 平成 26 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2016. 平成 27 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2017. 平成 28 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

NOSAI 連宮崎. 2018. 平成 29 年度家畜共済事業実績表. NOSAI 連宮崎, 宮崎.

Ohmori H, Nonaka I, Ohtani F, Tajima K, Kawashima T, Kaji Y, Terada

F. 2013. An improved dry ash procedure for the detection of titanium dioxide in cattle faces. *Animal Science Journal* 184, 726-731.

Oka A, Dohgo T, Juen M, Saito T. 1998b. Effects of vitamin A on beef quality,

weight gain, and serum concentration of thyroid hormones, insulin-like growth factor-I, and insulin in Japanese black steers. *Animal Science and Technology (Japan)* 69, 90-99.

Oka A, Maruo Y, Miki T, Yamasaki T, Saito T. 1998a. Influence of vitamin

A on the beef quality of the Tajima strain of Japanese Black cattle. *Meat Science* 48, 159-167.

大谷文博，田鎖直澄，上野孝志．2001．飼料への易発酵性炭水化物の添加が乳牛の糞尿窒素排泄量に及ぼす影響．日本畜産学会報 72，J239-J246．

Ørskov ER, Flatt WP, Moe PW. 1968. Fermentation balance approach to estimate extent of fermentation and efficiency of volatile fatty acid formation in ruminants. *Journal of Dairy Science* 51, 1429-1435.

乙丸孝之助，志賀英恵，鹿海淳子，柳田孝司．2015．鹿児島県における黒毛和種肥育去勢牛の血液生化学的性状．産業動物臨床医学雑誌 5，185-190．

Owens FN, Secrist DS, Hill WJ, Gill DR. 1998. Acidosis in cattle: A Review. *Journal of Animal Science* 76, 275-286.

Pethes GY, Bokori J, Rudas P, Frenyo, VL, Fekete S. 1985. Thyroxine, triiodothyronine, reverse-triiodothyronine, and other physiological characteristics of periparturient cows fed restricted energy. *Journal of Dairy Science* 68, 1148-1154.

Plaizier JC, Khafipour E, Li S, Gozho GN, Krause DO. 2012. Subacute ruminal acidosis (SARA), endotoxins and health consequences. *Animal Feed Science and Technology* 172, 9-21.

Plaizier JC, Li S, Le Sciellour M, Schurmann BL, Górká P, Penner GB. 2014. Effects of duration of moderate increases in grain feeding on endotoxins in the digestive tract and acute phase proteins in peripheral blood of yearling calves. *Journal of Dairy Science* 97, 7076-7084.

Purwanto BP, Abo Y, Sakamoto R, Furumoto F, Yamamoto S. 1990.

Diurnal patterns of heat production and heart rate under thermoneutral conditions in Holstein Friesian cows differing in milk production. *The*

- Journal of Agricultural Science* 114, 139-142.
- Roubicek CB, Ray DE. 1972. Serum protein and protein fractions in unsupplemented range cattle. *Journal of animal science* 34, 931-934.
- Roussel JD, Koonce KL, Pinero MA. 1972. Relationship of blood serum protein and protein fractions to milk constituents and temperature-season. *Journal of Dairy Science* 55, 1093-1096.
- 坂下邦仁，西博巳，別府成，田原則雄．2004．黒毛和種去勢牛における肥育中期の可消化養分総量（TDN）摂取量が枝肉脂肪蓄積量に及ぼす影響．西日本畜産学会報 47， 67-71．
- 阪谷美樹．2015．暑熱ストレスが産業動物の生産性に与える影響．産業動物臨床医学雑誌 5， 238-246．
- 千田惣浩，相馬祐介，渡邊潤，高橋利清，酒出淳一，伊藤盛徳．2014．黒毛和種肥育牛への飼料用米ソフトグレインサイレージの多給試験．秋田県畜産試験場研究報告 28， 18-27．
- Shaffer L, Roussel JD, Koonce KL. 1981. Effect of age, temperature-season, and breed on blood characteristics of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 64, 62-70.
- Sharma HR, Forsberg NE, Guenter W. 1979. The nutritive value of pressure-steamed aspen (*Populus tremuloides*) for mature sheep. *Canadian Journal of Animal Science*, 59, 303-312.
- 柴田正貴，向居彰夫．1981．暑熱環境と乳牛のエネルギー代謝．栄養生理研究会報 25， 60-85．
- 園田裕司，永井晴治，相原孝彦，島袋宏俊，埤谷繁，岩間裕子．1999．夏季の飼料中の NDF 水準が泌乳初期の養分摂取量，乳量等に及ぼす影響．長崎県畜産試験場報告 8， 4-7．

- Tajima K, Nonaka I, Higuchi K, Takusari N, Kurihara M, Takenaka, A, Aminov RI. 2007. Influence of high temperature and humidity on rumen bacterial diversity in Holstein heifers. *Anaerobe* 13, 57-64.
- Takigawa A. 1987. Feeding value of steamed wood and explosively depressurized wood. *Japan Agricultura Research Quarterly* Vol.20, 282-291.
- 渡辺大作, 安藤貴朗, 浅井沙央理, 大塚浩通, 高岸聖彦, 大橋修一, 熊田昇二, 芝文彦, 及川正明. 2010. 黒毛和種肥育牛の血漿 γ -グルタミルトランスフェラーゼ (GGT) と月齢および血液成分との関連. *産業動物臨床医誌* 1, 177-183.
- Warren WP, Martz FA, Asay KH, Hilderbrand ES, Payne CG, Vogt JR. 1974. Digestibility and rate of passage by steers fed tall fescue, alfalfa and orchardgrass hay in 18 and 32 C ambient temperatures. *Journal of Animal Science* 39, 93-96.
- West JW. 2003. Effect of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 86, 2131-2144.
- 山本禎紀. 1992. 家畜の温熱環境管理に関する研究課題. *日本畜産学会報* 63, 743-755.
- Young JW. 1977. Gluconeogenesis in cattle: significance and methodology. *Journal of Dairy Science* 60, 1-15.
- Zebeli Q, Metzler-Zebil BU, Ametaj BN. 2012. Meta-analysis reveals threshold level of rapidly fermentable dietary concentrate that triggers systemic inflammation in cattle. *Journal of Dairy Science* 95, 2662-2672.
- Zimbelman RB, Collier RJ, Eastridge M. 2011. Feeding strategies for high-producing dairy cows during periods of elevated heat and humidity. *Tri-*

State Dairy Nutrition Conf. The Ohio State University, Columbus, 111-126.

謝 辞

本論文の作成に当たり、終始ご懇切なるご教示とご校閲を賜りました筑波大学大学院生命環境科学研究科先端農業技術科学専攻の櫛引史郎教授に深甚なる万謝の意を表します。また、同大学大学院生命環境科学研究科先端農業技術科学専攻の三森眞琴教授、田島清准教授、同大学大学院生命環境科学研究科生物圏資源科学専攻の田島淳史教授に貴重なご意見をいただき心から感謝の意を表します。

本研究を進めるに当たり、データの解析について有益なご助言とご協力を戴きました東北大学大学院農学研究科の寺田文典教授、無線伝送式 pH センサーの利用について有益なご助言とご協力を戴きました岩手大学農学部佐藤繁教授ならびに山形東亜 DKK 株式会社、酸化チタンの分析についてご指導を戴きました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の永西修博士ならびに野中最子博士、本研究で供試した KP をご提供戴きました日本製紙株式会社に深く感謝の意を表します。

本研究の実施に際し、常に多大なご協力と有益なご教示を戴きました宮崎県畜産試験場酪農飼料部の西村慶子博士、同試験場の温谷茂樹氏、同試験場肉用牛部の石ヶ野公久氏、福永又三氏、非常勤職員、ならびに日々雇用職員各位に深く感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発温暖化の進行に適応する畜産の生産安定技術の開発(G系)」により実施しました。