HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高温環境下におけるホルスタイン種育成雌牛のエネルギー代謝と体蓄積配分に関する研究
Author(s)	野中, 最子
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第6975号
Issue Date	2015-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r6975
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/63894
Type	doctoral thesis
File Information	Itoko_Nonaka.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

高温環境下におけるホルスタイン種育成雌牛の
エネルギー代謝と体蓄積配分に関する研究

野 中　最 子

目次

1 章. 緒言

1.1. 研究の背景と目的 1

1.2. 従来の研究の概要

1.2.1. 温暖化が育成雌牛の生産性に及ぼす影響 3

1.2.2. 育成雌牛と暑熱環境 3

1.2.3. 育成雌牛のエネルギー要求量 6

2 章. 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予測
(実験 1a, 2a, 3a)

2.1. 目的 7

2.2. 試験方法 7

2.3. 結果 9

2.4. 考察 15

2.5. 小括 17

3 章. 高温環境がホルスタイン種育成雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝
に及ぼす影響

3.1. 育成前期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす高温の影響
(実験 1b)

3.1.1. 目的 18

3.1.2. 試験方法 18

3.1.3. 結果 22

3.1.4. 考察 28

3.1.5. 小括 31

3.2. 育成前期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす高湿度の影響
(実験 2b)

3.2.1. 目的 32

3.2.2. 試験方法 32

3.2.3. 結果 35

3.2.4. 考察 42

3.2.5. 小括 47

3.3. 育成後期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす高温の影響（実験 3b）

3.3.1. 目的 49
3.3.2. 試験方法 49
3.3.3. 結果 52
3.3.4. 考察 59
3.3.5. 小括 66

4 章. ホルスタイン種育成雌牛の高温環境下における代謝エネルギー要求量，利用効率および体蓄積配分（実験 1b, 2b, 3b, 4, 5, 6, 7）

4.1. 目的 67
4.2. 試験方法 67
4.3. 結果 73
4.4. 考察 76
4.5. 小括 78

5 章. 総合考察および結論

5.1. 温暖化の進行にともなう育成雌牛の夏季増体量の予測 79
5.2. 暑熱が春機発動前の育成前期雌牛における体蓄積配分に及ぼす影響 80
5.3. 暑熱下における育成雌牛の維持および成長に要する代謝エネルギー量 82
5.4. 暑熱下育成雌牛における適正飼料給与技術 83
5.5. 結論 86

要約 87

引用文献 90

謝辞 104

1 章. 緒言

1.1. 研究の背景と目的

夏季の高温時における家畜・家禽の生産低下は古くから問題点として認識されており，高温と生理生産反応の関係，体温調節機構の解明，そしてそれらに対する暑熱対策技術として，栄養管理，畜舎環境改善などの検討が盛んに行われてきた．乳牛では，1950 年代から 60 年代にかけて米国のミズーリ農業試験場において，乳生産，成長および各種生理反応に及ぼす温度，湿度，放射熱，風の影響について多くの報告がなされており(Ragsdale ら 1953; Johnson ら 1962; Kibler ら 1962; Kibler 1962; Cargill ら 1962; Kibler 1964)，特に温湿度を組み合わせた指標(Discomfort index (Thom ら 1959)，あるいは temperature-humidity index, THI))と乳生産の関係をみている．当時の乳牛を使った実験結果では，THI 76 以上で負の影響を受ける(Cargill ら 1962)と報告されたが，最近では THI72 以上で乳生産は負の影響を受ける(Armstrong 1994)，繁殖面では THI 68 以上で負の影響が出始める等，育種改良等による生産性の向上とともに暑熱の影響を受けやすくなっている(Kadzere ら 2002).

地球温暖化は今までにない現象であり，夏季期間の暑熱負荷が少なかった地域でも，今後は大きな影響を受ける可能性が懸念されている．IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が 2013 年に公表した第 5 次評価報告書によると，21 世紀末（2081 ～2100 年）には 20 世紀末（1986 ～ 2005 年）と比較して，気温は 1.0℃～ 3.7℃上昇すると予測している．このため近年になり，地球温暖化という長期的な視点において暑熱環境が家畜生産に及ぼす影響を正確に把握・推定する重要性が増してきている．これまでわが国においても畜産業をはじめ様々な農業分野で温暖化の影響評価が行われてきたが，乳用種育成雌牛においてその影響をみた報告はない.

ホルスタイン種牛は本来冷涼な気候を適温域とするため暑熱には弱く，特に泌乳牛は高温下で生産を低下させることはよく知られており，環境温度 25～27℃以上で乳量の減少，乳成分率の変動，受胎率の低下が認められる．また，乾物摂取量はこれよりも低い温度域から低下が始まるとされている(柴田 1983; Badinga ら 1985; 栗原ら 1995; 農業･食品産業技術総合研究機構 2007; Berman 2011; West 2003). 一方，育成雌牛は泌乳牛と比較して，体重あたりの体表面積の割合が大きいため，熱放散がしやすいこと，さらに，エネルギー要求量も維持の 2 倍程度と小さいことから，高温による生産への負の影響は小さいと考えられていた(Badinga ら 1985; West 2003)．そのため，育成雌牛の生産性に及ぼす暑熱の影響を検討した報告は泌乳牛と比べ少ない.

高温による育成雌牛の乾物摂取量低下の割合に比べて，増体量低下の割合は非常に大きい(Colditz と Kellaway 1972)，夏季は冬季と比較してホルスタイン種子牛の血中グルコースおよび甲状腺ホルモン濃度は低下する(Marai ら 1995)，暑熱ストレスを受けた育成雌牛は黄体退行が遅れる(Wilson ら 1998)など，暑熱の程度や家畜側の要因(ステージや増体量)によっては生理応答や繁殖において負の影響を認めた報告がもある．さらに，近年では分娩が早期化しており，これにより育成雌牛の増体速度が上昇するため育成雌牛はこれまでより高温の影響を受けやすい飼育環境にあるといえる．

乳牛の効率的な飼養管理の重要性から，わが国のホルスタイン種成雌牛の維持や生産に要する代謝エネルギー量(橋爪ら 1963a; Shibata と Mukai 1979; 柴田ら 1982; 栗原ら 1990), 離乳前後のホルスタイン種去勢雄子牛の維持や成長に要する代謝エネルギー量(関根ら 1985, 1986; Sekine ら 1987)については今まで数多くのデータが蓄積されている．しかし，成長過程にある育成雌牛の維持や成長に要する代謝エネルギー量について検討した研究成果はわが国ではほとんどない．酪農経営に占める育成期の飼料コストは 15～20% (Heinrichs 1993)であることから，ホルスタイン種育成雌牛の維持および成長に要するエネルギー量を精密に把握することは非常に重要であると考えられる．特に，わが国の酪農経営において温暖化の進行が危ぶまれる状況の中でも育成雌牛の効率的な生産を行うために，高温環境下での育成雌牛の維持エネルギー要求量や成長に対するエネルギー量の利用効率を定量する必要性は高まっている．

地球温暖化が進行する中で，これからの育成雌牛の適切な飼養管理技術を確立するためには，①夏季高温時における育成雌牛の生産低下に及ぼす高温の影響とその影響の及ぶわが国の地域を評価するとともに，②暑熱環境が育成雌牛の生理応答，エネルギーおよび物質出納に及ぼす影響を詳細に検討し，③高温環境下での育成雌牛の代謝エネルギー要求量等を明らかにする必要がある．

本研究は，上に挙げた課題を解決するために，以下の点について検討した．まず，2 章ではわが国のホルスタイン種育成雌牛に及ぼす温暖化の影響を地域ごとに解析し地図上で示し，3 章では育成雌牛に及ぼす暑熱環境の影響を生理応答，エネルギーおよび物質出納の面から解析した．4 章では高温環境下での代謝エネルギー(ME)要求量，利用効率および体蓄積配分について検討した．以上の結果に基づき，5 章では，夏季における温暖化進行時に育成雌牛の生産低下を抑制する飼養管理技術について総合的に考察した．

1.2. 従来の研究の概要

1.2.1. 温暖化が育成雌牛の生産性に及ぼす影響

近年，二酸化炭素やメタンなど大気中の温室効果ガス濃度の上昇にともなう温暖化が地球規模で懸念されている．IPCC が 2013 年に公表した 第 5 次評価報告書によれば，21 世紀の終わり(2081～2100 年)には 20 世紀末(1986～2005 年)と比較して，最も温室効果ガス排出量が少ないシナリオでは気温上昇が地球全体で平均 1.0℃(可能性が高い予測幅は 0.3～1.7℃)，最も排出量が多いシナリオでは平均 3.7℃(可能性が高い予測幅は 2.6～4.8℃)と予測している．温暖化の進行は，夏季における日平均気温の上昇を示すだけでなく，夜間気温，すなわち，日最低気温の上昇，また，夏季期間そのものの長期化等も予測されており，もともと暑さに弱い家畜にとって暑熱環境がますます過酷になることが懸念されている．そのため，温暖化による負の影響予測をできるだけ正確に幅広く検討することは，今後起こりうる事態への備えになり，対策を考える手立てにもなる．

このような背景により，これまでわが国においても様々な農業分野について研究が行われてきた．植物分野ではまず水稲(米村ら 1998 ; 林ら 2001)で行われ，次に果樹(杉浦と横沢 2004)について報告されている．畜産分野では，家畜の飼料である牧草の栽培適地と生産量の変動(佐々木 2005), ブロイラー(山崎ら 2006)および肥育豚 (高田ら 2008)の生産性におよぼす温暖化の影響について報告されている．また，牛については，栗原ら(1995)が泌乳牛で試算をしており，温暖化により夏季の平均気温が 28～30℃以上となった場合の乳生産は，平均気温が 26℃の時より約 10%低下することを提示している．しかし，初回分娩を迎えるまでの育成雌牛の生産への影響予測について報告したものはない．

1.2.2. 育成雌牛と暑熱環境

家畜は直接的または間接的に温暖化の影響を受けると考えられる．泌乳牛では，合衆国の西南部において夏季間の乳生産が既に 5～14% 低下しており，受胎率は約 36%低下しているといわれている(Gitay ら 2001)．また，Badinga ら(1985) も冬季と比べ夏季における受胎率は 20～30%低いと報告している．しかし，夏季生産性の低下が著しい泌乳牛と比較して，育成雌牛は代謝による産熱量が少なく，かつ，体格に対する体表面積が広いため，暑熱ストレスの影響をそれほど受けないと考えられてきた(Cavestany ら 1985)．

一方，高温は春機発動期や初産分娩月齢を遅らせ(NRC, 2001)，暑熱ストレスにより維持に要するエネルギー量は増加する一方で，食欲は低下するため胎子が小さくなり，出生後の成長も遅い(NRC 1981)．環境温度の上昇は体温の上昇を導き，乾物摂取量を低下させる(West 2003)可能性も指摘されている．Colditz と Kellaway (1972)は，高温によるホルスタ

イン種育成雌牛に及ぼす負の影響は, 採食量の低下は 14%であったが, 増体量の低下は 50%であったと報告した．また，Marai ら(1995)は，ホルスタイン種育成雌牛における増体量，血漿中サイロキシン濃度およびグルコース濃度は，夏季は冬季と比較して有意に低下すると報告した.

暑熱ストレスが家畜の栄養に及ぼす影響は，飼料の消化動態の特性の変化としてよく知られている(Beede と Collier 1986)．反すう家畜では，消化率と高温環境には負の相関がある一方で，相関はないという報告(NRC 1981; Lu 1989)，あるいは，粗飼料主体飼料の場合は高温環境で消化率が高まるという報告(Christopherson 1985)があり，結果は一貫していない．Mathers ら(1989)は，エアシャー種牛の消化率を 33℃と 20℃で比較した場合，中程度の品質の飼料では 33℃で消化率は増加したが，高品質の場合は変わらなかったと報告した. Christopherson と Kennedy(1983)は, 高温により飼料の消化管通過速度が遅くなると，消化率は増加すると報告した.

高温環境下における肥育牛の増体量と屠体重量は適温下よりも低くなる一方で，腎臓や心臓に付着している脂肪量は適温下より高温下での方が増加する(White ら 1992)．また，血漿中のクレアチニン濃度および尿中への窒素排泄量は適温下より高温下の方が増加するが，それは，筋肉分解の増加とタンパク質合成の低下が原因と考えられている(Schneider ら 1988; Kellaway と Colditz 1975)．これらの知見から，成長を目的とする育成雌牛において体タンパク質蓄積が低下することは問題である.

環境側の要因として，高温環境下では，高湿度も生産性への負の影響をもたらす大きな要因の 1 つである(Bianca 1962; 三村ら 1971)．温度だけでなく湿度の暑熱負荷もあわせて評価するため，不快指数(Discomfort index)，温湿度指数(Temperature-himidity index, THI)，黒球湿度指数(Black globe-humidity index, BGHI)や体感温度(Sensible temperature)など様々な指標が使われている(三村と森田 1988)．これまで一般的に利用されてきた指標の例を以下に示した.

① 乾球温度(℃)×0.35＋湿球温度(℃)×0.65　(Bianca 1962)

② 0.4×(乾球温度(°F)＋湿球温度(°F))＋15　(Thom 1959)

③ 0.55×乾球温度(°F)＋0.2×露点温度(°F)＋17.5　(Cargill ら 1962, ②の湿球温度を露点温度へ改変)

④ 乾球温度(°F) – [(0.55 – (0.55×相対湿度/100)×(乾球温度(°F) – 58)]　(NRC 1971)

⑤ 乾球温度(℃)＋0.36×露点温度(℃) + 41.5　(Jhonson 1980, ③の°F を℃に改変)

⑥ 黒球温度(℃)＋0.36×露点温度(℃) + 41.5　(Buffington ら 1981, 輻射熱も加味するとより適切であると⑤の乾球温度を黒球温度に改変)

⑦ (0.81×乾球温度(℃)＋0.99×(相対湿度/100)×(乾球温度(℃)－14.4))＋46.3　(④の°Fを℃に改変，現在の米国気象局で不快指数を計算するのに使用されている)

①は英国で子牛に環境温湿度を変えた暑熱を負荷したときの体温の変化を元に，暑熱による負の影響を温度：湿度で 35：65 として作成された数式である．②は米国においてヒトの暑熱時のすごしにくさ（不快指数）を地域ごとに評価する時に考えられた指標であり，温度と湿度の作用は 1:1 ある．その数式を泌乳牛の温熱環境を表す指数として用い，ホルスタイン種泌乳牛を使い，負の影響が出てくる THI の値を調べたものが③であり，THI75 以上で負の影響が出てくると報告されている．③,⑤,⑥は温度(華氏か摂氏)，湿度(湿球温度，露点温度，相対湿度(RH))，気温(乾球温度か黒球温度)の表し方は異なっているが，元は②の式であり，泌乳牛において暑熱による乳生産への負の影響が現れる値は 72 以上とされている(Armstrong 1994).

湿度を加味した指標は次の二つの理由により①式(Bianca 1962)を用いることが適切であろう．すなわち，第一にウシ(育成雌牛)を用いて作成した数式であること，また，第二に，高温下での相対湿度の負の影響はウシでは大きいと考えられ，Bohmanova ら(2007)も高温多湿の地域では湿度の重みが大きい指標が適していると示唆している．そこで本論文では，ウシに作用する温度と湿度の影響が 1：1 ではなく 35：65 とした①式(Bianca 1962)を用いることにした．

戸田ら(2002)は，高温多湿なわが国西南暖地の夏季において，乳量は気温の上昇よりも相対湿度の増加が顕著な梅雨時期の 6 月から大きく低下することを報告している．また，塩谷ら(1997)は，高温環境下における泌乳牛では，熱放散量に占める潜熱放散の割合が高まるが，高湿度になると潜熱放散量および全熱放散量が低下し，体温が上昇して，採食量および乳生産量が低下することを報告している．したがって，高湿度は高温環境下の育成雌牛にも負の影響を及ぼすと考えられるが，高温環境下の育成雌牛に及ぼす高湿度の影響を生理応答態とエネルギー・物質出納の両面から詳細に検討した報告はない.

また，体重の小さい動物は，体重の大きい動物に比較して，体重あたりの体表面積は大きいため，熱放散に有利とされ(三村と森田 1988)，体重が大きいほど強く暑熱の負の影響を受けること(堀 1981)はよく知られている．このため，成牛と比較して体重あたりの体表面積が大きい育成雌牛は，体重あたりの熱放散量が大きく暑熱環境に強いのは確かであろう．しかし，その一方で，育成雌牛の体重の増加にともない，暑熱に対する反応が育成のステージによって異なる可能性を示している.

栗原ら(1990, 1991)は，維持量給与時のホルスタイン種乾乳牛において，環境温度 18℃，相対湿度(RH)60%と比較して 26℃RH60%および 32℃RH60%では，呼吸数の増大などによ

り熱放散機能が亢進し，体温の恒常性維持のため維持に要する ME 量が約 6～15%増加すると報告している．日増体量 0.8kg 前後の育成雌牛の ME 要求量は，日本飼養標準・乳牛(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)によれば，育成ステージに関係なく維持の ME 要求量の 1.9 倍であることから，育成雌牛は維持量摂取の乾乳牛と比較して暑熱による負の影響は異なる可能性がある．さらに育成ステージの前半と後半でも影響は異なる可能性がある．しかし，同様の飼養管理により飼育した育成前期雌牛および後期雌牛に及ぼす環境温度の影響を詳細に検討した研究は，現在までほとんどなされていない．

1.2.3. 育成雌牛のエネルギー要求量

わが国の乳牛において，成長や生産量に応じて必要な栄養素やエネルギー量を求めることは，飼料の経済的利用，生産能力の向上等，乳牛を精密に飼養するためには必須である．成雌牛の維持や生産に要する代謝エネルギー量については，わが国におけるこれまでの代謝試験成績に基づき精密に算出されている(橋爪ら 1963a; 橋爪ら 1963b; 柴田 1983; 栗原ら 1995)．さらに，離乳前後のホルスタイン種去勢雄子牛の維持や成長に要する代謝エネルギー量については，関根ら(1985,1986)と Sekine ら(1987)が詳細に検討している．一方，24 ヵ月齢の育成雌牛の体格は年々大きくなっており(Kadzere ら 2002)，現在の育成雌牛は，30~50 年前の育成雌牛とは生理面や栄養面において変化していることは十分推測されるが，近年において離乳後から分娩までの成長過程にある育成雌牛の維持や成長に要する ME 量について検討した研究成果はわが国においてはない．海外においては，体重 400kg 前後のヘレフォード種去勢牛(Birkelo ら 1991)，体重約 380kg のヘレフォード種 F1 育成雌牛(Hotovy ら 1991)，体重約 380kg のネローレ種雄牛および去勢牛(Tedeschi ら 2002)の維持に要する ME 量についてそれぞれ報告されている．しかし，これらの報告は全て肉用種牛の結果であり，近年の乳用種育成雌牛の ME 要求量を検討することが必要と考えられる。

地球規模での温暖化が懸念されている現在，高温環境下では泌乳牛の生産性の低下のみならず，育成雌牛においても増体量の低下が明らかになっており，高温環境下での育成雌牛の維持エネルギー要求量や成長に対するエネルギー量の利用効率について検討することは非常に重要と考えられる．しかし，育成雌牛に関する高温時の ME 要求量を詳細に検討した研究は，現在までわが国においてはもちろん，世界においてもほとんど存在しない．

2 章. 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予測（実験 1a, 2a, 3a）

2.1. 目的

夏季の高温時という比較的短期間における家畜・家禽の生産性低下は古くから問題点として認識されてきた(Shibata と Mukai 1979; 栗原ら 1995). 近年では，地球温暖化という長期的な視点が新たに加わり，日常的な暑熱環境が畜産に及ぼす影響を正確に把握・推定する重要性が増してきている.

栗原ら(1995)は, わが国各地域のホルスタイン種泌乳牛の乳量に及ぼす気候温暖化の影響評価について都道府県の平均気温からおおまかな試算を行っている．早期分娩による乳牛の生産性向上が求められている現在の育成雌牛は，高温の影響を従来の育成雌牛よりも受けやすくなっていることが予想される．暑熱負荷により増体速度が低下すれば育成期間が延長し，初産月齢が延びるなど経済的な損失が発生するため，泌乳牛と同様に育成雌牛においても暑熱による生産性低下を把握し，長期的に予測することは重要と考えられる．そこで本章では，他分野での予測手法を応用して，主に月平均気温の変動予測をもとに，将来の育成雌牛生産に及ぼす温暖化の影響を検討した.

2.2. 試験方法

以下の 3 回の実験データを用いて, 高温環境が育成雌牛の増体に及ぼす影響を検討した.

実験 1a

ホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭(平均月齢 7.7±0.2 ヵ月，平均体重 198±37 kg) を用い, 環境温度 20,28 および 33℃(RH は 60%一定)の順に各 2 週間負荷する実験を環境制御室(岩崎ら 1982)において行った．イタリアンライグラスサイレージ，アルファルファヘイキューブ，配合飼料を乾物で 45 : 5 : 50 とした飼料(CP14.8%，TDN37.9%)を日本飼養標準・乳牛(2007)に基づき日増体量(DG)0.8kg を見込んで 1 日 2 回にわけて給与した．飲水は自由摂取とした. 各 2 週間の後半 4 日間に開放型呼吸試験装置において全糞尿採取による消化試験および呼吸試験を行った. 消化試験中 4 日間の飼料摂取量と消化試験前後の体重を測定した．給与飼料，残飼，糞および凍結乾燥した尿の熱量は，燃研式熱量計(CA-4PJ；島津製作所，京都市)により測定した．総エネルギー(GE)摂取量から糞へのエネルギー(FE)排泄量を差し引いて求めた可消化エネルギー(DE)を求め，DE から尿およびメタンへのエネルギー排泄量を差し引いて ME 摂取量を求めた. メタンの熱量は 1 L あた

り 39.539 kJ として換算した.

実験 2a

湿度が上昇したときの高温環境の影響を調べるために，ホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭(平均月齢 10.1±1.0 ヵ月，平均体重 251±19 kg) を用い，環境温度 20,28 および 33℃(RH を 80%一定)の順にを各 2 週間負荷する実験を，実験 1 と同様の方法で行った.

実験 3a

体重が異なる牛における暑熱の影響を明確にするために，ホルスタイン種育成後期雌牛 4 頭(平均月齢 17.1±1.0 ヵ月，平均体重 418±2kg)を用い，実験 1 と同様の条件および方法で行った.

各動物実験において飼料およびストール環境への馴致期間(3～4 週間)を十分とった後に予備期を開始した．本実験は独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所動物実験実施に関する要領に基づいて実施した.

温暖化が育成雌牛の増体量に及ぼす環境温度の影響

山崎ら(2006)と同様の解析法により検討し，その結果を日本地図上に示した．将来の気候予測のデータとして，Yokozawa ら(2003)の「気候変化メッシュデータ(日本)」を解析に用いた．これは，東京大学気候システム研究センター(CCSR)，国立環境研究所(NIES)の CCSR/NIES モデル，カナダの気候モデル・解析センター(CCCma)の CGCM1 モデル，オーストラリア CSIRO の CSIRO-Mk2 モデルおよびドイツの気象センターの ECHAM4/OPYC3 モデルの 4 つの大気・海洋循環結合モデル(AOGCM)を採用した気候シナリオであり，それらの予測結果を約 10×10km 単位にメッシュ(2 メッシュ)化したものである．このデータベース内の 2020～2060 年代における月平均気温を，それぞれのモデルにおいて各メッシュ，年代ごとに予測し，4 つのモデルの平均値を予測値とした．さらに，この計算値から所定の温度域に該当するメッシュを抽出し，地図上に図示するプログラム(杉浦と横沢 2004)を用いて解析した．現在の気候については「メッシュ気候値 2000」(気象庁 2002)における月平均気温を用いた．これは，1971～2000 年における気象庁の観測値をもとに,わが国の気候を約 1×1km 単位のメッシュ(3 次メッシュ)ごとに推定したものである．これらの解析法をもとに，地球温暖化による影響が大きいと考えられる夏季(7～9 月)の解析結果について日本地図で図示した.

温暖化の育成雌牛への影響について，以下の二つの検討を行った．第一の検討としては，RH60%における育成前期および後期雌牛の実験結果(実験 1a および 3a) を用いて環境温度の上昇が育成雌牛の生産性に及ぼす影響を試算し，その結果と Yokozawa ら(2003)の「気候変化メッシュデータ(日本)」を用いて，2020 年代，2040 年代および 2060 年代における温暖化の影響について日本地図上で推定した．第二の検討として，暑熱環境下において湿度の高低は育成雌牛の生産性を大きく左右すると考えられるので(Bianca 1962; 三村ら 1971; 戸田ら 2002), 環境温度に湿度を組み込んだ式「体感温度(乾球温度×0.35＋湿球温度×0.65; Bianca 1962)」を暑熱負荷の指標として，実験 1a および 2a の結果から，RH を組み込んだ生産性への影響をより明確にすることを試みた．なお，これらの検討に際して，現在の気温および RH は，気象庁の過去 30 年間(1971～2000 年)の平均値を用いた．

2.3. 結果

2.3.1. 環境温度が育成雌牛の増体量に及ぼす影響

RH60%時の育成前期および後期のホルスタイン種雌牛の代謝体重(MBS)あたりの ME 摂取量(MEI)に及ぼす環境温度の影響を図 2-1 に示した． RH60%では，実験条件内の環境温度(20～33℃)において，育成前期雌牛の MEI は，環境温度の上昇にともなう有意な低下を認めなかった．しかし育成後期雌牛においては，RH60%において環境温度の上昇にともなう採食量の低下が有意であった($P < 0.01$).

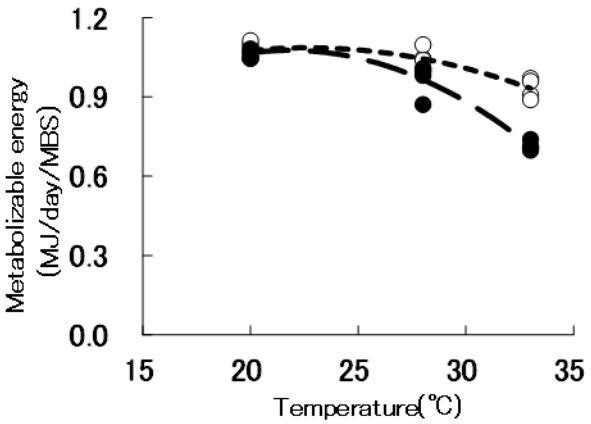

Figure 2-1 Relationship between ambient temperature and metabolizable energy intake of heifers.
○: early stage heifers (8 months old)
●: late stage heifers (15 months old)

実験 1a～3a において体重測定は行ったが，実測した体重から DG を精度良く推定することが困難であった．そこで，MEI から維持に必要なエネルギー量(以下 ME_m)を差し引いて DG を推定した(予測 DG＝(MEI－ME_m)/(0.1355×MBS)；日本飼養標準　乳牛(農業・食品産業技術総合研究機構 2007))．日本飼養標準・乳牛(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)では，暑熱下における維持に要する ME 量は 26℃以上では 10%増加するとしているが，暑熱下でのエネルギー消費量は維持だけでなく生産においても増加する可能性があると考え，暑熱下での ME_m の補正は行わなかった．この前提条件下で推定した DG を元に，育成前期および後期のホルスタイン種雌牛の DG に及ぼす環境温度(RH60%時)の影響を図 2-2 に示した．その結果，MEI が減少すると DG に消費しうるエネルギー量は少なくなるため，MEI が減少する高温時では育成雌牛の DG の低下が顕著に表れ，また，その低下は育成前期よりも後期において著しいことが推定された．

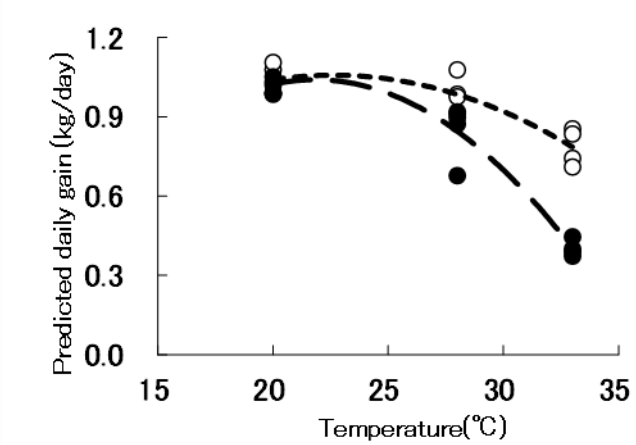

Figure 2-2 Relationship between ambient temperature and predicted daily weight gain of heifers.
○: early stage heifers (8 months old)
●: late stage heifers (15 months old)

育成期全般における環境温度と DG の関係を推定するために育成前期と後期のデータをあわせて体重 200～420kg の育成雌牛における環境温度と DG の回帰式を作製した．環境温度 20℃時の DG を 100 として，環境温度と DG との関係を全データから試算した結果，以下の回帰式が得られた．

$y = -0.3712x^2 + 16.41x - 79.76$ （$n=24, R^2 = 0.6737$）

y：環境温度 20℃・RH60%の時を 100 とした育成雌牛の DG

x：環境温度(℃)，環境温度 20℃～33℃に適用

この回帰式から，DG が 5%低下する環境温度を 26.4℃，15%低下する気温は 28.8℃と推定された．そこで，24.1℃以下(DG 影響なし)，24.2～26.4℃(DG 0～5%低下)，26.5～28.8℃(DG 5～15%低下)，28.9℃以上(DG 15%以上低下)を示すメッシュを色分けして，現在，2020 年代，2040 年代および 2060 年代の 7 月，8 月および 9 月の結果を算出し，日本各地において高温が育成雌牛に及ぼす影響を視覚的に示した(図 2-3)．現在の 7 月では，九州の南西部，瀬戸内，東海および関東の平野部において 0～5%程度の DG 低下が示される．それが，2020 年代には西日本のほとんどの地域において 5～15%程度の DG 低下が見込まれ，その低下地域が 2060 年代には関東地域および北陸海岸部まで拡大し，東北地方全域においても 0～5%の DG 低下が見受けられた．8 月では，現在も九州，近畿地方，東海地方および関東の一部においては 5～15%の DG 低下が示されたが，2020 年代には九州，瀬戸内の一部において 15%以上の DG 低下が見込まれ，2060 年代には西日本および東海，北陸，関東まで 15%以上の DG 低下を示す地域が拡大することが予測された．また，現在の 9 月では，DG 低下の影響は示されていないが，年代が進むにつれ西日本および関東，北陸において 5%程度の DG 低下が，九州沿岸および瀬戸内沿岸においては 5～15%程度の DG 低下が見受けられた．

山崎ら(2006)の解析と同様，温暖化にともなう気温上昇の予測幅を考慮して，2060 年代の温度分布予測値に単純に±1℃を増減した場合の分布を図示した(図 2-3)．温度上昇が＋1℃の場合と－1℃の場合では，その影響の度合いは大きく異なるが，－1℃の場合であっても，現在と比較すると増体量の低下は明らかであった．

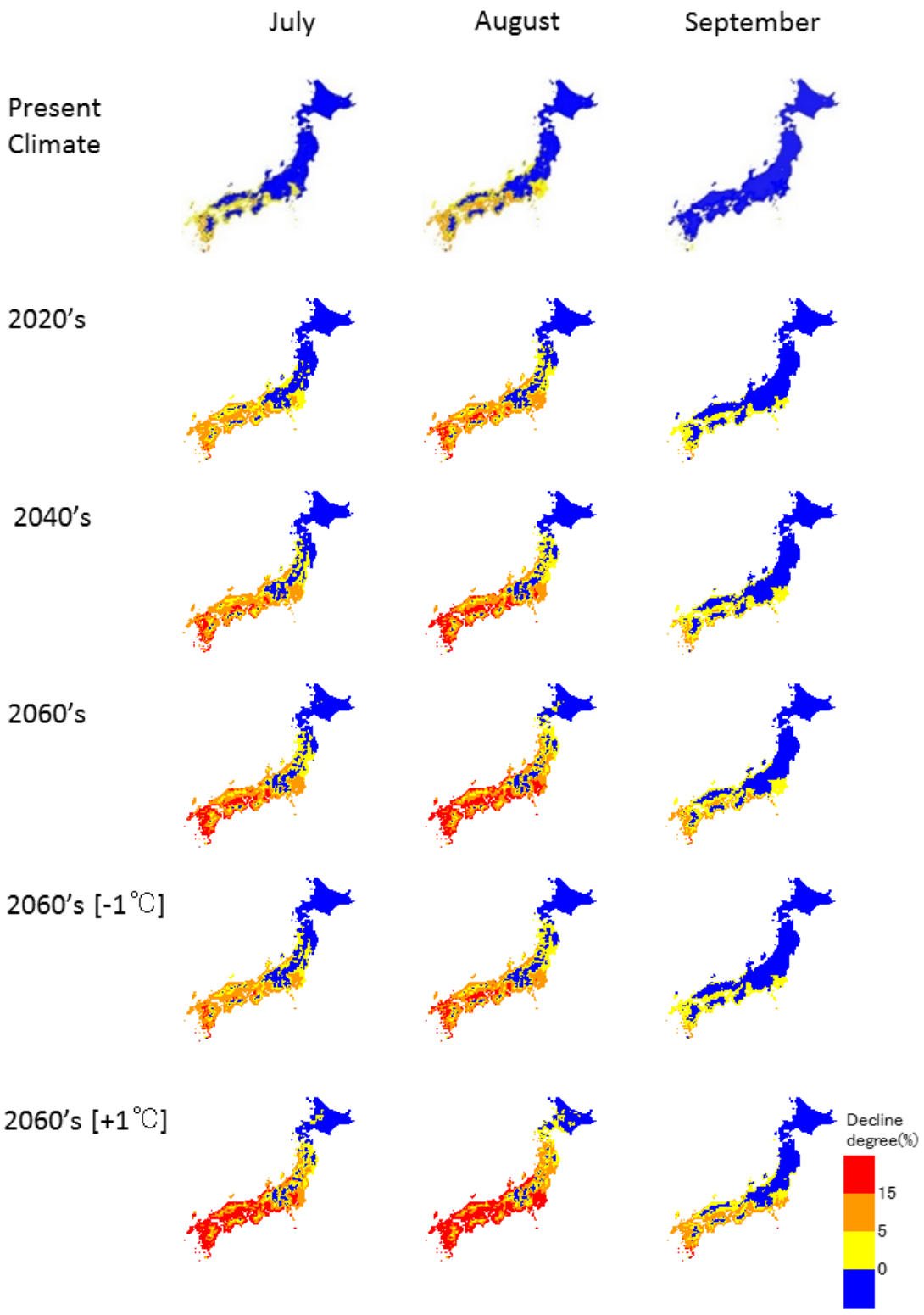

Figure 2-3 Spatial distribution of declining degree of daily weight gain of Holstein heifers in the present and in the 2020's, 2040's, and 2060's, 1℃ decrease from the 2060's, 1℃ increase from the 2060's.

2.3.2. 環境温湿度が育成前期雌牛の増体量に及ぼす影響

環境温度 20℃時の DG を 100 とした場合の環境温度と DG の関係を図 2-4 に示した．育成前期雌牛の DG は，RH80%では環境温度 20℃と比較して 28℃および 33℃で有意に低下し， 20～33℃の範囲において有意な低下は認められなかった RH60%時の結果とは異なった．そこで，育成前期雌牛を用いた実験 1a および 2a で得られた DG と，そのときの環境温度と湿球温度から算出できる体感温度(Bianca 1962)を用いて，以下の回帰式を得た．

$y = -0.7753x^2 + 30.68x - 199.9$ $(n=24, R^2 = 0.6248)$

y：体感温度 17.1℃時を 100 とした育成前期雌牛の DG

x：体感温度(℃)，体感温度 17.1℃～30.1℃に適用

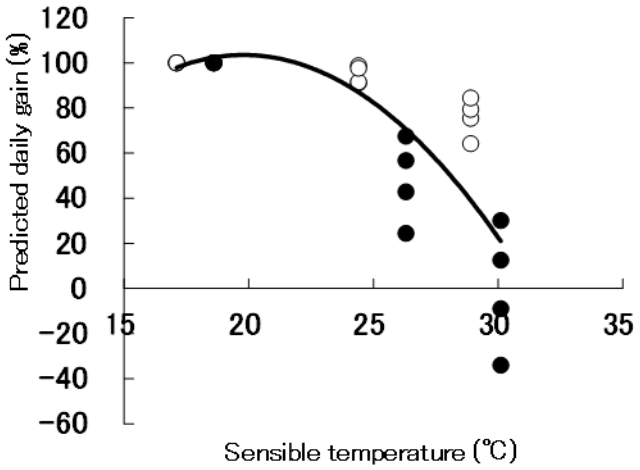

Figure 2-4 Relationship between ambient temperature and predicted daily weight gain of heifers.
Sensible temperature: dry-bulb temperature × 0.35
＋wet-bulb temperature × 0.65 (Bianca 1962)
○: heifers under RH60% environment
●: heifers under RH80% environment

RH の将来予測に関しては，海水からの水分供給がほぼ無限と考えられるため，地球規模ではおそらく変わらないであろうという見解(Trenberth と Jones 2007)が一般的であるが，気温で行われているような 10×10km 単位での予測はほとんどなされていない．そこで，「現在と変わらない」「現在より 5%単位上昇する」「現在より 5%単位低下する」の 3 つに分け，上記の回帰式を用いて，将来の温暖化の影響を推定した．ただし，日本国内で RH を測定している地点は約 100 ヵ所あるが，気温を測定している 4500 ヵ所と比べわずかであり，日

本地図で図示することは困難であった．そのため，湿度を組み込んだ温暖化の影響予測については，日本の北と南で行うことにし，北海道の道央から東半分の地域と九州の南にある熊本県，宮崎県，鹿児島県を代表地域としてとりあげて比較することとした．その際，RH を測定している気象台がある場所として，北海道中東部地域は帯広，広尾，紋別，雄武，旭川，釧路，網走の 7 カ所を，南九州地域は熊本，阿蘇，宮崎，都城，鹿児島，枕崎の 6 カ所を取り上げ，それらの平均気温および平均 RH をもとに，温暖化の影響について検討し，図 2-5 に示した．

最も暑さが厳しいと考えられる 8 月において，北海道中東部地域および南九州地域での現在の平均気温および平均 RH は，北海道中東部地域で 19.1℃，83.6%，南九州地域で 25.7℃，80.7%であった．そして，2060 年代には現在より北海道中東部地域では約 4℃，南九州地域では約 3℃の気温上昇が予測された．

南九州地域における現在の DG は 0.79kg であり，適温下(体感温度 17.1℃)の DG である 0.93kg と比較して 15%の低下が示される．また，RH が現在と同じ場合でも 2060 年代には DG は 0.63kg と低下し，RH が 5%単位上昇した場合の影響はさらに大きく，2060 年代には DG は 0.59kg と現在と比較して 25%も低下することが予測された(図 2-5)．しかし，北海道中東部地域においては，RH が 5%単位上昇する 2060 年代においても増体量は低下しないことが予測された(図 2-5)．

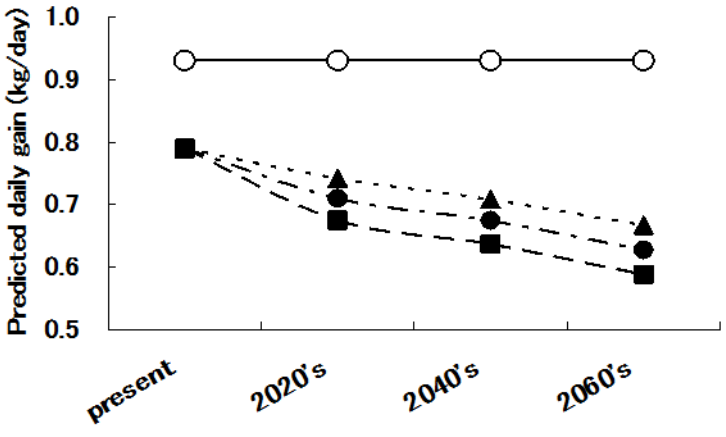

Figure 2-5 Declining predicted daily weight gain of Holstein heifers in August of the present year, 2020's, 2040's and 2060's at southern Kyushu area and northern-eastern Hokkaido area.
○: Relative humidity －5～＋5% in northern-eastern Hokkaido area
▲: Relative humidity －5% in southern Kyushu area
●: Relative humidity ±0% in southern Kyushu area
■: Relative humidity ＋5% in southern Kyushu area

2.4. 考察

育成雌牛は泌乳牛と比較して，体重に占める体表面積の割合が大きく，熱放散がしやすいため，採食量や増体に及ぼす暑熱の影響はそれほど大きくないと考えられており，育成雌牛と暑熱環境の関係を詳細に検討した研究は極めて少ない．しかし，育成雌牛の増体速度や血中サイロキシン濃度，グルコース濃度は，冬より夏の方が低いという報告(Marai ら 1995)や，環境温度 30℃，RH52%の場合，体重 200～350kg の育成雌牛の採食量は環境温度が 20℃の時と比較して 17%の低下であったが，増体量の低下は 38%であったとの報告(Kellaway と Colditz 1975)もあり，この傾向は本研究の結果と同様であった．したがって，温暖化にともない暑熱環境が今以上に深刻化することになれば，育成雌牛の生産性の低下についても大きな問題となると考えられる．

また，一般的に，暑熱の影響は体重によってその反応が異なるとされており，体重が重いほど強く影響を受ける（堀 1981）．本解析からも，体重 200kg 前後の育成前期雌牛においてはRH60%では 33℃まで環境温度の影響は少なく，増体量はほとんど低下しなかった．しかし，体重 400kg 程度の育成後期雌牛では RH60%の場合でも，25.5℃で増体量は 5%低下するという結果を得ており，これは泌乳牛の生産性が低下するといわれている環境温度 24～27℃(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)と同程度である．現在の日本全体における平均 RH は 70%前後(気象庁 2002)であることから，RH が 60%で得られた実験結果を RH70%時の体感温度で読み替えると 28℃60%は 26.4℃70%，33℃60%は 31.0℃70%となり，育成後期雌牛における温暖化の影響はさらに深刻になる．また，育成前期雌牛における暑熱の負の影響は，実験 1a の RH60%時と実験 2a の RH80%時のちょうど中間と考えられる．

一方，本実験における温度負荷は日内変動がなく一定であるため，日内変動がある実際の環境と比較して，同じ平均温度であっても暑熱負荷を過大に評価している可能性もある(塩谷ら 1997)．その場合，日内の最高気温と最低気温の幅が広い地域ほど影響は小さいと考えられる．しかし，育成雌牛，特に受胎前後である育成後期雌牛の場合は，繁殖成績に及ぼす影響も考慮すると，暑熱による負の影響は決して小さくないことが示唆されている(Wilson ら 1998; Gitay ら 2001)．

暑熱環境下においてウシは温度に加え湿度の影響を大きく受けることが明らかにされており(Bianca 1962; 三村ら 1971)，乾球温度および湿球温度を用いた体感温度は，ウシの温熱感覚を表す有効な指標であると戸田ら(2002)も報告している．本実験においても，RH60%では体重 200kg 台の育成雌牛に高温の影響はほとんど認められなかったが，RH を 80%に高めた場合，増体量は大きく減少した．このことからも，温暖化による育成雌牛の生産性

への影響を予測する際に，温度だけでなく湿度を加味することが重要であると考えられる．しかしながら，温暖化にともなう RH の将来予測に関しては未だ一致した知見は得られておらず，また，気温のような地域ごとの予測もほとんど行われていないため，今後の動向を十分に注視する必要がある．

IPCC の第 3 次評価報告書では，2100 年の世界平均気温は 1990 年と比較して 1.4~5.8℃上昇する(野田ら 2001)としていたが，2007 年の第 4 次評価報告書(IPCC 2007)では，環境の保全と経済の発展が地球規模で両立する社会(すなわち，最も排出量が少ないシナリオ)であれば上昇温度は 1.8℃(可能性が高い予測幅は 1.1～2.9℃)であり，化石エネルギー源を重視しつつ，高い経済成長を実現する社会(すなわち，最も排出量が多いシナリオ)であれば 4.0℃(可能性が高い予測幅は 2.4～6.4℃)であると，シナリオを細かく分けることで，より精密に予測しようとしている．本解析で用いた「気候変化メッシュデータ(日本)」(Yokozawa ら 2003)は，第 2 次評価報告書を元に作製されたプログラムであるが，温暖化が及ぼす影響を畜種間で比較するために，先に検討されたブロイラー(山崎ら 2006)および肥育豚(高田ら 2008)と同じプログラムを用いた．

ブロイラー(山崎ら 2006)および肥育豚(高田ら 2008)において，増体量が 5%低下する環境温度はそれぞれ 27.2℃，24.5℃，15%低下する環境温度は 30.0，27.3℃であり，肥育豚が最も低温から暑熱負荷の影響を受け，次に育成雌牛，そしてブロイラーという順であった．出荷までの日数は，ブロイラーで約 50 日，肥育豚で約 7 ヵ月であるため，ブロイラーおよび肥育豚の生産性に及ぼす夏季における暑熱の影響は非常に深刻であるが，育成雌牛はそれらと比較して育成期間が約 24 ヵ月と長いため，夏季に受けた暑熱の影響を秋や冬で回復できることも考えられる．

本章では冬に対する温暖化の影響は検討しなかったが，温暖化による冬期間の気温上昇も当然予測され，寒冷地などにおける育成雌牛の生育にはプラスの効果も考えられるだろう．しかし，夏季に人工授精などの繁殖予定がある場合には，温暖化により大きな負の影響が予想され，生産へのダメージも想定される．さらに，暑熱環境下では増体量は低下しなくともタンパク質蓄積が低下するとの報告もある(Kellaway と Colditz 1975; White ら 1992)．一方，温暖化にともなう牧草の栽培適地と生産量の変動を調べた研究(佐々木 2005)では，牧草の夏枯れ地帯は北上・拡大するが，現在の寒地型牧草栽培地帯において暖地型牧草を栽培すれば生産量は増加するため，牧草全体では 1.5 倍の増収を予測している．しかし，温度と二酸化炭素濃度の上昇により，牧草の繊維成分は増加し，栄養価は低下すること，暖地型牧草は寒地型牧草と比較して，栄養価，消化率，嗜好性ともに低いため，牧草収量が増えたとしても，良質粗飼料の生産量は低下することを示唆している．このよう

に，育成雌牛の繁殖や粗飼料まで考慮すると，育成雌牛の飼養管理システム全体としては温暖化の影響は決して小さくはないであろう．

家畜生産に対する暑熱対策としては，畜舎環境の改善，飼料給与技術の開発，育種が重要であるといわれている．飼料給与面からの暑熱対策技術として泌乳牛では，第一胃内での熱発生量を低減するために，良質な粗飼料を給与すること，濃厚飼料割合を増加させること，バイパス油脂を添加して摂取飼料を高エネルギー化すること等が推奨されている(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)．しかし，飼料への油脂添加は肥育豚では脂肪としての体蓄積を促進する(Katsumata ら 1996)ため，育成雌牛においても筋肉の成長を期待できない可能性があり，今後の課題の一つであると考えられる．

以上のことから，RH60%程度の場合においても，年代の経過にともない高温による増体量の低下が認められる地域が東北全域に拡大し，7 月および 8 月ではその低下する程度も大きいことが予測された．

2.5. 小括

ホルスタイン種育成雌牛を用いて温度および湿度の上昇と増体量の関係を実験的に明らかにし，月平均気温の変動予測シナリオから，わが国の育成雌牛に対する温暖化の全国的な影響について検討した．その結果，気温上昇にともない育成雌牛の増体量が気温 20℃ RH60%の時に比べ，26.4℃で 5%，28.8℃で 15%低下することが予測された．わが国の育成雌牛の夏季増体量は温暖化の影響を受け，2020，2040，2060 年と年代の経過にともない増体量の低下する地域は拡大することが示された．さらに，育成前期雌牛を用いて気温の他に湿度の影響も加味したところ，2060 年代において，南九州地域では RH が現在と同じ場合でも増体量が 21%低下する一方，北海道中東部地域では RH が 5%単位上昇してもほとんど変化しないと予測された．以上の結果から，今後，温暖化の進行にともない，わが国各地で育成雌牛の夏季の増体量が低下すること，また，その低下量は地域によって異なり，湿度の増減によっても大きく変動することが示された．

3 章. 高温環境がホルスタイン種育成雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす影響

3.1. 育成前期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす高温の影響（実験 1b）

3.1.1. 目的

育成雌牛は泌乳牛と比較して，体重に占める体表面の割合が大きく，熱放散がしやすいこと，さらに，エネルギー要求量も維持の 2 倍程度と小さいことから，高温の負の影響は小さいと考えられていた(Badinga ら 1985; West 2003)．しかし，本研究 2 章において，育成後期雌牛や育成前期雌牛でも RH80%の場合は飼料摂取量が低下し，全国各地で増体低下が予測されることを示唆した．高温高湿環境下での育成雌牛における生産減は，窒素・エネルギー代謝自体が影響を受けると推測される．特に，遺伝的に改良が進み大型化した現在の育成雌牛において新たな情報を得ることは重要である．しかしながら，高温環境下における育成雌牛の飼料の消化管内通過速度やエネルギーおよび窒素代謝，血液成分および第一胃内容液性状に関する情報はほとんどない．

そこで，本研究では，環境温度の上昇が春機発動前の育成前期雌牛の生理応答，エネルギーおよび窒素出納，第一胃内発酵に及ぼす影響について，20℃，28℃，33 で行った実験 1a に測定項目を追加して検討した．

3.1.2. 試験方法

3.1.2.1. 環境温湿度処理

環境条件は，環境温湿度を制御できる代謝実験棟(畜産草地研究所，茨城県つくば市；岩崎ら 1982)に育成雌牛を収容し，相対湿度(RH)を 60%に設定し，1 期 14 日間で環境温度を 1 期 20℃，2 期 28℃および 3 期 33℃と順に負荷する 3 処理とした．

3.1.2.2. 供試動物および供試飼料

実験には，ホルスタイン種育成雌牛 4 頭(第 1 期，20℃実験開始時の平均体重 211±4(±標準誤差)kg，平均月齢 7.7±0.2 ヵ月齢)を供試した．供試飼料は，イタリアンライグラスサイレージ，アルファルファヘイキューブ，配合飼料とし，乾物で 45：5：50 の割合で給与した．供試飼料の組成および化学分析組成を表 3-1 に示した．給与した飼料全体としての粗タンパク質(CP)および中性デタージェント繊維(NDFom： ‘om’は有機物を示し，灰分を含まない)は，それぞれ 14.8%および 37.9%(表 3-1)であった．これら供試飼料への馴致は，一般管理牛舎において 2 週間以上行った．

Table 3-1 Ingredients and chemical composition of diet fed to heifers

		Amount
Ingredient (% of total daietary DM)		
Italian ryegrass silage		45.1
Alfalfa hay cube		4.9
Concentrate pellet		50.0
(% of concentrate pellet, DM base)		
Corn		30.0
Barley		25.0
Wheat bran		9.0
Defatted rice bran		7.0
Soybean meal		11.7
Molasses		3.5
Alfalfa meal		7.0
Beet pulp		5.0
Calcium carbonate		1.2
NaCl		0.5
Minerals and vitamins supplement		0.1
Chemical composition		
OM	(% of DM)	92.1
CP	(% of DM)	14.8
EE	(% of DM)	2.8
NDFom	(% of DM)	37.9
NFC	(% of DM)	36.5
GE	(MJ/kgDM)	18.7

DM: dry matter
OM: organic matter
CP: crude protein
EE: ether extracts
NDFom: neutral detergent fiber
NFC: non fibrous carbohydrate
GE: gross energy

3.1.2.3. 代謝実験棟における飼養管理

パドックにおいて試験飼料に馴致後，供試牛は代謝実験棟内へ移動し，環境温度 20℃，RH60%でラバーマットを敷いた個別スタンチョンや開放型呼吸試験装置などの飼養施設に 3 週間かけて馴致し，設定した増体量 0.8kg/日に達したことを確認してから実験を開始した．飼料給与量は，日本飼養標準(乳牛)2006 年版(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)に基づき DG0.8kg を満たす量とし，10:00 および 16:00 の 2 回に分けて給与し，翌日 9:30 に残飼を回収，計量した．飼料給与量は，実験処理期間の 42 日間を通して一定とした．水およびミネラルブロック(E100Z；日本全薬工業，郡山市)は自由摂取とした．実験は，農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所動物実験実施に関する要領に基づいて実施した．

3.1.2.4. 窒素・エネルギー出納試験およびサンプリング項目

各期 14 日間の後半 4 日間を本試験期とし，開放型呼吸試験装置において糞尿分離機を用いた全糞尿採取を行った．本試験期 4 日間のうち 3 日間は朝 10:00 から翌朝 9:30 までを 1 日とする呼吸試験も同時に行った．残飼は 9:30 に回収し，配合飼料，イタリアンライグラスサイレージ，アルファルファヘイキューブの乾物量を測定し，それぞれの乾物給与量から乾物残飼量を差し引いて乾物摂取量を算出した．尿採取時には，アンモニアとして窒素が損失しないように採取缶にあらかじめ 20%濃硫酸を 400～500 mL 入れた．本試験期間中に回収した新鮮糞および新鮮尿は計量した後，その一部を冷蔵庫に保存した．各期の本試験終了後には，残飼および糞尿を一頭毎に日々の残量および排泄量の割合に応じて混合した．混合した糞の一部は，新鮮糞のまま冷蔵保存し，残りの糞は通風乾燥(60℃48 時間)した後，1 mm のスクリーンを通るように粉砕した．混合した尿の一部は，窒素(N)濃度を測定するために新鮮尿で冷蔵保存し，燃焼熱量(E)を測定するためにポリエチレンフィルムに入れて凍結乾燥した(－50℃,72 時間，伊藤と田野 1977)．給与飼料および残飼サンプルの一部は，60℃で通風乾燥した後，1 mm のスクリーンを通るように粉砕し化学分析に供した．

飲水量は，毎日 9:30 に飲水計により測定した．体重は，試験開始前および各試験期の 5,10,14 日目の 9:30 に測定し，各試験期の 10 日目と 14 日目を平均した値をその期の体重として示した．平均 DG は，各試験期における体重測定値の回帰直線から算出した．直腸温および呼吸数は各試験期後半 4 日間の朝の飼料給与前に測定した．各試験期における最終日の朝の飼料給与前には，頸静脈からヘパリン入試験管に血液を，経口から第一胃内容液を採取した．血液は遠心分離(1870×g,15 分,4℃)後，得られた血漿を－30℃で冷凍保存した．第一胃内容液は採取後直ちに 4 重ガーゼで濾過し，pH を測定した後，－30℃で冷凍保存した．

粗飼料の全消化管における通過速度は，マーカー法(Hong ら 1988；大下ら 1995)を用いて測定した．すなわち，各試験期の 8 日目朝の給与直前に，塩化イッテルビウム($YbCl_3$)溶液で標識したイタリアンライグラス(イタリアンライグラス 100 g に対して Yb 0.84 g)を経口摂取させた．Yb で標識した飼料の投与前，投与後 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 48, 60, 72, 84, 96,120 時間目に直腸から糞を採取した．

3.1.2.5. 分析項目

給与飼料，残飼については，乾物(DM, 930.15)，CP(9442.05)，粗脂肪(EE, 920.39)を常法(AOAC 2000)により測定した. NDFom は Van Soest et al. (1991)の方法に従い測定した．糞および尿の N 含量は冷蔵保存した試料を用いてケルダール法(AOAC 944.205)により分析した．乾燥した糞の EE，灰分，NDFom は前述の方法により測定した．飼料，残飼，糞および凍結乾燥した尿の燃焼熱量は，燃研式熱量計(CA-4PJ；島津製作所，京都市)により測定した．非繊維性炭水化物(NFC)は有機物から NDFom，CP，EE を差し引いて求めた．

血漿中の総タンパク質(TP)，アルブミン，血中尿素態窒素(BUN)，アスパラギン酸トランスフェラーゼ(AST)，アラニンアミノトランスフェラーゼ(ALT)，グルコース，総コレステロール，トリグリセライド，ケトン体，アルカリフォスファターゼ(ALP)，カルシウム(Ca)および遊離脂肪酸(NEFA)の濃度を血液自動分析計(7250 型；日立ハイテク，東京)で測定した．トリヨードサイロニン(T_3)およびサイロキシン(T_4)濃度は，化学発光酵素免疫測定法による依頼分析により得た(三菱メディエンス株式会社，東京)．N^{τ}-メチルヒスチジンは，血漿をスルホサリチル酸で除タンパク後，アミノ酸自動分析計(L8500 型；日立製作所，東京)で分析した．

第一胃内容液は，遠心分離(1870×*g*,15 分,4℃)し，その上清を用いて，揮発性脂肪酸をガスクロマトグラフィー(6890 型 ; Hewlett-Packard, Wilmington, DE, USA)により測定した．アンモニア態窒素濃度はインドフェノール法(Weatherburnm 1967)により測定した．

経時的に採取した直腸糞は，60℃で通風乾燥後，粉砕し，Hart と Polan (1984)の方法に従い，原子吸光分光光度計(AA-6800F 型 ; 島津製作所, 京都市)により Yb 濃度を測定した．これらを Grouvum と Williams(1973)の方法を用いて飼料の消化管内通過速度を算出した．

DE 摂取量は，GE 摂取量から FE 排泄量を差し引いて求めた．ME 摂取量は，DE 摂取量から尿およびメタンへのエネルギー排泄量を差し引いて求めた．メタンの熱量は 1 L あたり 39.539 kJ として換算した．熱発生量(HP,kJ)は以下の計算式で求めた．

HP(kJ/日)＝ 16.175×O_2(L/日)＋5.021×CO_2(L/日)
－2.167×CH_4(L/日)－5.987×尿中 N(g/日)　(Brouwer 1965)

蓄積エネルギー量(RE)は ME 摂取量から HP を差し引いて算出した．タンパク質としての蓄積量(g/日)は蓄積 N 量(g/日)に 6.25 を乗じて算出した．脂肪としての蓄積量(g/日)は以下の計算式にて求めた．

脂肪としての蓄積量(g/日)＝{RE(kJ/日)
－タンパク質としての蓄積エネルギー量(kJ/日)}/39.3　(ARC 1980)

タンパク質としての蓄積量(kJ/日) は以下の計算式にて求めた．

タンパク質としての蓄積エネルギー量(kJ/日)
＝タンパク質としての蓄積量(g/日)×23.8　(ARC 1980)

3.1.2.6. 統計処理

全てのデータについて，SAS (2008)の GLM プロシジャにより温度処理の効果を分散分析し，有意差($P < 0.05$)あるいは傾向($P < 0.1$)の認められたデータを対象に処理間差の検定を Tukey の多重検定により行った．

3.1.3. 結果

高温環境が育成前期雌牛の飼養成績に及ぼす影響を表 3-2 に示した. 体重は環境温度の上昇とともに増加した. 試験期間中の平均 DG は, 温度処理間で有意差は認められなかった. 直腸温は 20℃と比較して 28℃では 0.2℃増加の傾向($P < 0.10$)があり，33℃では 1.2℃増加した($P < 0.05$)．1 分あたりの呼吸数および 1 日あたりの飲水量は，環境温度の上昇にともない増加した．

高温環境が育成前期雌牛の DM 摂取量(DMI)および DM,NDF,NFC の消化率に及ぼす影響を表 3-2 に示した．総 DMI は，環境温度 20℃時と比較して 33℃では粗飼料摂取量の低下にともない低下する傾向にあった($P < 0.1$)．一方，DM 消化率は 20℃と比較して 33℃で増加した($P < 0.05$)．

Table 3-2 The effects of high environmental temperature on physiological status, feed intake, feed digestibility and daily gain of heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Body weight	(kg)	227.2[c]	241.1[b]	253.6[a]	2.6	0.001
Average daily gain	(kg/day)	0.931	1.114	0.866	0.175	0.611
Rectal temperature	(°C)	38.9[b]	39.1[b]	40.1[a]	0.1	<0.001
Respiration rate	(times/min)	32.8[c]	55.5[b]	90.5[a]	2.4	<0.001
Water intake	(L/day)	23.9[b]	29.5[ab]	38.4[a]	3.1	0.041
Total DMI	(kg/day)	5.72	5.65	5.18	0.14	0.077
Concentrate intake	(kg/day)	2.81	2.81	2.80	0.00	<0.001
Roughage intake	(kg/day)	2.91	2.84	2.38	0.14	0.079
DM digestibility	(%)	70.26[b]	72.37[ab]	73.89[a]	0.59	0.014
NDFom digestibility	(%)	57.27	59.11	59.86	0.70	0.094
NFC digestibility	(%)	90.39[b]	91.90[a]	91.30[ab]	0.24	0.011

SEM: standard error of the mean

[abc] Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成前期雌牛の飼料通過速度に及ぼす影響を表 3-3 に示した．20℃における第一胃内の粗飼料の通過速度に対して，28℃では低下する傾向にあり($P < 0.1$)，33℃では有意に低下した($P < 0.05$)．一方，全消化管内飼料の滞留時間は，20℃と比較して，33℃では有意に長く($P < 0.05$)，マーカーの初期出現時間も，20℃に対して 28℃で長かった($P < 0.05$)．

Table 3-3 The effects of high environmental temperature on passage rate of feed in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Rate constant of ruminal passage of feed	(%/h)	3.09[a]	2.40[ab]	1.36[b]	0.28	0.012
First appearance of marker in feces	(h)	6.93[b]	8.30[a]	8.26[ab]	0.31	0.033
Retention time of total digestive tract	(h)	55.85[b]	61.63[b]	91.77[a]	4.29	0.002

SEM: standard error of the mean
[ab]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成前期雌牛の血液成分に及ぼす影響を表 3-4 に示した．33℃では 20℃と比較して BUN が増加した($P < 0.05$)が，ヘマトクリット値(Hct, $P < 0.05$)，グルコース濃度($P < 0.05$)および NEFA 濃度($P < 0.05$)は低下した．全タンパク質およびアルブミン濃度は，温度処理間で差は認められなかった．T_3 濃度は 20℃および 28℃と比較して，33℃で有意に低下した($P < 0.05$)．T_4 濃度に処理間差は認められなかった．N^{τ}-メチルヒスチジン濃度は，温度処理間で差は認められなかった．

Table 3-4 The effects of high environmental temperature on blood composition of heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Hematocrit	(%)	31.3[a]	29.4[ab]	28.2[b]	0.6	0.022
Total protein	(mg/mL)	71.2	71.9	70.6	0.9	0.622
Albumin	(mg/mL)	37.6	38.8	39.7	0.7	0.197
Urea nitrogen (BUN)	(mg/dL)	6.68[b]	7.50[ab]	11.31[a]	0.10	0.031
Glucose	(mg/dL)	97.5[a]	93.9[a]	78.4[b]	1.5	0.001
Total cholesterol	(mg/dL)	81.7	77.9	59.5	7.4	0.154
Triglyceride	(mg/dL)	17.0	18.1	12.9	2.3	0.308
Total ketone bodies	(μmol/L)	316	303	367	26	0.258
Non-esterified fatty acid (NEFA)	(μEq/L)	45.2[a]	45.9[a]	21.1[b]	4.2	0.009
Triiodothyronine (T_3)	(ng/mL)	1.45[a]	1.32[a]	0.95[b]	0.05	0.001
Thyroxine (T_4)	(ng/mL)	58.5	63.5	67.8	2.5	0.102
Plasma N^{τ}-methylehistidine	(nmol/mL)	4.19	4.56	5.26	0.40	0.236

SEM: standard error of the mean
[ab]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成前期雌牛の第一胃内性状に及ぼす影響を表 3-5 に示した．33℃の pH は，20℃より低下した($P < 0.05$)．揮発性脂肪酸における酢酸割合は 33℃で低下した($P < 0.05$)．プロピオン酸および吉草酸割合は，温度処理間で差はなかった．酪酸割合は，20℃および 28℃と比較して 33℃で増加する傾向にあった($P < 0.1$)．33℃における酢酸プロピオン酸比(AP 比)は，20℃および 28℃と比較して低下した($P < 0.05$)．

Table 3-5 The effects of high environmental temperature on rumen fermentation parameters in heifers

		Environmental temperature			SEM	Probability
		20°C	28°C	33°C		
pH		7.08[a]	6.92[ab]	6.77[b]	0.05	0.018
NH_3-N	(mg/dL)	7.34	6.68	6.44	1.21	0.867
Total VFA	(mmol/L)	74.8	77.2	77.5	4.8	0.915
Acetic acid	(mol%)	71.6[a]	71.4[a]	67.8[b]	0.5	0.004
Propionic acid	(mol%)	16.3	16.5	17.6	0.4	0.129
Butyric acid	(mol%)	9.39	9.37	11.49	0.61	0.079
Valeric acid	(mol%)	2.74	2.80	3.09	0.12	0.183
Acetic : Propionic		4.40[a]	4.33[a]	3.86[b]	0.11	0.021

SEM: standard error of the mean
[ab]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成前期雌牛の窒素の利用に及ぼす影響を表 3-6 に示した．33℃における窒素摂取量は, 20℃時と比較して低下する傾向にあった($P < 0.1$). 一方, 摂取 CP の消化率は, 20℃時と比較して 28℃時および 33℃時で増加した($P < 0.05$). 摂取 N に対する尿への N 排泄割合は，20℃および 28℃と比較して 33℃で増加した($P < 0.05$)．摂取 N に対する蓄積 N 割合は 33℃で有意に低下した($P < 0.05$).

Table 3-6 The effects of high environmental temperature on nitrogen utilization in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Nitrogen intake	(g/day)	136.3	132.9	125.6	2.6	0.068
Fecal nitrogen	(g/day)	57.3^{a}	48.1^{ab}	43.8^{b}	2.3	0.017
Urinary nitrogen	(g/day)	35.2^{b}	40.1^{b}	52.5^{a}	1.9	0.002
Retained nitrogen	(g/day)	43.8^{a}	44.7^{a}	29.3^{b}	1.8	0.002
CP digestibility	(%)	57.95^{b}	63.73^{a}	65.32^{a}	1.27	0.014
Nitrogen intake	(g/day/BW$^{0.75}$)	2.331^{a}	2.173^{b}	1.977^{c}	0.028	<0.001
Fecal nitrogen	(g/day/BW$^{0.75}$)	0.981^{a}	0.787^{b}	0.688^{b}	0.035	0.003
Urinary nitrogen	(g/day/BW$^{0.75}$)	0.600^{b}	0.655^{b}	0.827^{a}	0.034	0.008
Retained nitrogen	(g/day/BW$^{0.75}$)	0.749^{a}	0.732^{a}	0.462^{b}	0.027	0.001
Fecal nitrogen	(% of intake)	42.1^{a}	36.2^{b}	34.7^{b}	1.3	0.014
Urinary nitrogen	(% of intake)	25.8^{b}	30.2^{b}	42.1^{a}	2.0	0.003
Retained nitrogen	(% of intake)	32.2^{a}	33.7^{a}	23.2^{b}	0.1	0.001

SEM: standard error of the mean
^{abc}Different superscripts in the same row indicate significant differences (P<0.05).

高温環境が育成前期雌牛のエネルギーの利用性に及ぼす影響を表 3-7 に示した．33℃時の GE 摂取量)は，20℃時と比較して低下する傾向にあった($P < 0.1$)．一方，エネルギー消化率は，20℃時と比較して 33℃時では増加した．GE 摂取量に対する尿への排泄エネルギー割合は，環境温度の増加にともない増加した($P < 0.05$)．GE 摂取量に対する ME 摂取量の割合は，温度処理間で差は認められなかった．エネルギーの蓄積量は温度処理間で差は認められなかった．

Table 3-7 The effects of high environmental temperature on energy utilization in heifers

		Environmental temperature			SEM	Probability
		20°C	28°C	33°C		
Gross energy intake (GEI)	(MJ/day)	106.4	105.6	97.0	2.7	0.089
Digestible energy intake (DEI)	(MJ/day)	73.2	75.0	70.1	1.8	0.218
Metabolizable energy intake (MEI)	(MJ/day)	62.9	63.9	59.2	1.5	0.149
Gross energy intake	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	1.820^{a}	1.727^{a}	1.525^{b}	0.033	0.002
Fecal energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.567^{a}	0.500^{a}	0.422^{b}	0.017	0.003
Urine energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.043^{b}	0.055^{a}	0.059^{a}	0.001	<0.001
Methane energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.134^{a}	0.128^{a}	0.112^{b}	0.003	0.008
Heat production	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.828^{a}	0.767^{b}	0.698^{c}	0.010	0.000
Retained energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.248	0.278	0.234	0.014	0.163
Fecal energy	(% of GEI)	31.2^{a}	29.0^{ab}	27.6^{b}	0.6	0.020
Urinary energy	(% of GEI)	2.4^{c}	3.2^{b}	3.9^{a}	0.1	<0.001
Methane energy	(% of GEI)	7.3	7.4	7.3	0.1	0.804
Heat production	(% of GEI)	45.5	44.4	45.8	0.5	0.182
Retained energy	(% of GEI)	13.7	16.1	15.4	0.7	0.112
Digestibility (DEI/GEI)	(%)	68.9^{b}	71.0^{ab}	72.4^{a}	0.6	0.020
Metabolizability (MEI/GEI)	(%)	59.2	60.5	61.2	0.6	0.102

SEM: standard error of the mean
^{abc}Different superscripts in the same row indicate significant differences (P<0.05).

高温環境が育成前期雌牛の蓄積エネルギー配分(体タンパク質あるいは体脂肪)に及ぼす影響を表 3-8 に示した. 体脂肪としてのエネルギー蓄積量は温度処理間で差は認められなかったが，体タンパク質としてのエネルギー蓄積量は 20℃時および 28℃時と比較して 33℃時で有意に低下した($P < 0.05$)．体タンパク質重量に対する体脂肪重量の割合は，20℃時と比較して 33℃時で増加した($P < 0.05$).

Table 3-8 The effects of high environmental temperature on energy distribution in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Retained energy	(MJ/day)	14.55	16.98	14.89	0.92	0.209
as fat	(MJ/day)	8.02	10.31	10.52	0.91	0.184
as protein	(MJ/day)	6.53[a]	6.66[a]	4.37[b]	0.28	0.002
Retained body composition						
as fat	(g/day)	204.0	262.5	267.6	23.4	0.184
as protein	(g/day)	273.7[a]	279.4[a]	183.4[b]	11.5	0.002
fat : protein	(ratio of weight)	0.745[b]	0.955[ab]	1.544[a]	0.144	0.020

SEM: standard error of the mean
[ab]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

3.1.4. 考察

3.1.4.1. 高温環境が育成前期雌牛の採食量，消化率，飼料の通過速度に及ぼす影響

本実験では，飲水量は環境温度の増加にともない増加した．Kurihara ら(1989)は，呼吸数はウシの潜熱放散の有効な指標となると述べている．28℃において 20℃と比較して呼吸数は増加し，体温は 0.2℃増加しており(表 3-2)，体温増加抑制に潜熱放散が有効に寄与していると考えられた．しかし，33℃では， 顕熱放散の減少により熱放散による体温の上昇を抑制できなかった(栗原ら 1990; 塩谷ら 1997)と考えられた．その結果，20℃時と 28℃時では DMI に差はなかったが，33℃では低下する傾向にあった．

反すう家畜の飼料消化率に及ぼす高温による正の影響は，飼料の消化管内通過速度の低下 (Warren ら 1974; Christopherson と Kennedy 1983; Beede と Collier 1986; Christopherson 1985), 配合飼料の選択採食による飼料構成の変化(Warren ら 1974; Colditz と Kellaway1972; Christopherson 1985)，あるいは DMI の減少 (Colditz と Kellaway 1972; Christopherson 1985)等によると考えられている．本試験においても育成雌牛の DM 消化率は，環境温度の上昇にともない増加した．一方，反すう家畜において高

温環境と消化率には負の影響がある，あるいは関係はないとの報告もある(NRC，1981; Beede と Collier 1986; Lu 1989)．ウシの DM 消化率は，粗飼料主体飼養では，高温により増加すると言われている(Christopherson 1985)．エアシャー種牛の DM 消化率は，一般的な飼料給与では20℃と比較して33℃で有意に増加したが高品質飼料では同程度であった(Mathers ら 1989)．本実験において，給与飼料の品質は決して低いものではなかったので，28℃時の DM 消化率の増加は，高温により消化管運動が低下し，消化管における飼料滞留時間が増加したためと考えられた．一方，33℃における DM 消化率の増加は，粗飼料摂取量が低下し(20℃: 2.91, 33℃: 2.38 kg/日)，摂取した飼料の粗濃比が変わったためと考えられた．

Colditz と Kellaway (1972)は，環境温度が 17℃から 38℃に上昇した時，ホルスタイン種育成雌牛の採食量は 14%しか低下しなかったが，増体量は 50%低下したと報告した．本実験 1b において，日平均増体量は環境温度 33℃においても影響を受けなかったが，これは，33℃において若干低下した採食量分を高い消化率で補い，DE 摂取量と ME 摂取量が低下しなかったためと考えられた．

3.1.4.2. 高温環境育成前期雌牛の血液および第一胃内性状に及ぼす影響

暑熱ストレスは，ウシにおいて代謝による熱負荷を最小限にするために細胞の酸素消費量を減少させ(Alnaimy ら 1992)，赤血球の破壊や血液の希釈がおこりヘマトクリット値が低下するという報告があり(Marai ら 1991; Johnson ら 1991)，本実験 1b も同様の結果であった．

育成雌牛の血液性状に及ぼす暑熱の影響を調べた報告はほとんどないが， Marai ら(1995)は，フリージアン種育成雌牛の血漿中甲状腺ホルモン，グルコース，全タンパク質，BUN 濃度を測定した結果，いずれの測定項目も夏は冬と比較して低い値になった．本実験では，T_3 およびグルコース濃度は 20℃と比較して 33℃で有意に低下した ．一方，BUN は20℃と比較して 33℃で増加した．

甲状腺ホルモンである T_3 および T_4 は，家畜の環境温度適応に関して重要な役割を持っていることはよく知られており，特に T_3 は熱産生と深く関わっている(Alnaimy ら 1992)．甲状腺ホルモンは，反すう家畜において環境温度と負の相関があり，甲状腺ホルモンの低下が消化管運動の低下，ひいては飼料通過速度の低下をひき起こしているのかもしれない(Christopherson 1985). Baccari ら(1983)は，T_3 濃度は暑熱負荷より低下し，それは増体量と正の相関があると報告した．本実験 1b では，T_4 濃度は環境温度と相関はなかったが，T_3 濃度は環境温度の増加にともない低下した．

暑熱環境下における血漿中グルコース濃度は，DMI の減少や糖新生の減少により，低下すると考えられている(Segura ら 1979; Shaffer ら 1981; Marai ら 1995)．一般的に，グルコースは肝臓でプロピオン酸から作られているが，本実験において，第一胃内容液におけるプロピオン酸濃度やその割合は，温度処理間で差はなかった．また，飲水量の増加によって血漿中の水分が増加し，その結果としてのグルコース濃度の希釈も考えられるが，ヘマトクリット値の減少(33℃時は 20℃時の 90%)以上に，グルコース濃度は減少しており(33℃時は 20℃時の 80%)，他の理由もあるかもしれない．インスリン濃度については測定しておらず，その関係についてはわからなかった．

暑熱環境下のホルスタイン種泌乳牛や育成雌牛において BUN は低下するという報告がある(Shaffer ら 1981; Segura ら 1979; Marai ら 1995)．これは，採食量の低下が第一胃内のアンモニア態窒素濃度の低下を引き起こし，血液から第一胃内への尿素態窒素の再吸収が高まるためと考えられている(Alnaimy ら 1992)．一方，肥育牛や泌乳牛で高温環境は BUN 濃度を増加させるとの報告もあり(White ら 1992; 寺田ら 1999)，本実験の結果と一致している．第一胃内容液のアンモニア態窒素濃度は，給与前では温度処理間で差はなかったが，給与後 3 時間では 20℃および 28℃と比較して 33℃で増加した．33℃で BUN の増加は，窒素の回転率が高まったため，あるいは，体タンパク質合成量が低下したためかもしれない．

3.1.4.3. 高温環境が育成前期雌牛の体タンパク質あるいは体脂肪へのエネルギー配分に及ぼす影響

本実験において，GE 摂取量に対するエネルギー蓄積量の割合は温度処理間で有意差はなかった．28℃あるいは 33℃の高温環境下では，体脂肪としてのエネルギー蓄積量が 20℃より 2.3 あるいは 2.5MJ/日増加した(表 3-8)．また，33℃では，体脂肪蓄積にまわったエネルギー量と同程度(2.2MJ/日)の体タンパク質蓄積が低下した．このことは，暑熱環境下では体タンパク質よりも体脂肪へ蓄積が配分される傾向にあることを示している．その理由として，暑熱環境下ではタンパク質分解が高まり，体タンパク質蓄積が低下することが考えられる．BUN 濃度の増加は，暑熱環境下におけるタンパク質の異化と関連する．そこで，筋肉分解の指標とされている N^{τ}-メチルヒスチジン濃度(Nagasawa ら 1993; Kamiya ら 2006)を測定したところ，予想に反して温度処理間に差は認められなかった(表 3-4)．

もう一つの理由として，T_3 濃度の低下によるタンパク質合成の低下が考えられた(表 3-4)．Kellaway と Colditz(1975) は，フリージアン種育成雌牛において，暑熱負荷は体タンパク質蓄積減少による尿への窒素排泄量の増加，採食量低下による窒素摂取量の低下を指摘し，

窒素蓄積量の減少は，筋肉組織における RNA 濃度の低下，尿へ排泄されるクレアチニン割合の増加と関連があると報告した．Schneider ら(1988)によると，血漿中のクレアチニン濃度や尿中のクレアチニン濃度は，適温下より高温下で高くなり，それは，摂取量の減少やストレスにより筋肉の異化が起こるためと考察している．El Fouly ら(1979)は，高温下ではタンパク質組織の異化の亢進により，微生物体タンパク質合成量の指標となるアラントイン排泄量は増加すると報告している．本実験では体タンパク質の異化が亢進していることをデータで裏付けることは出来なかったが，体タンパク質合成の低下は十分に考えられ，高温環境下における体タンパク質蓄積の低下が起こったと考えられた．

さらに，高温環境下ではウシの体脂肪の蓄積を増加させる可能性がある．ニワトリのヒナやブロイラー(Kubena ら 1972; Kubena ら 1974)では，高温環境下での体脂肪蓄積の増加が報告されている．さらに，Christon(1988)や Katsumata ら(1996)も，高温環境下の肥育豚において背脂肪厚の増加を報告している．肥育牛においては，腎臓，骨盤，心臓周辺への体脂肪の付着が確認されている(White ら 1992)．

Sejrsen ら(1982)は，標準的な育成では，乳腺発育の相対成長期間に高栄養飼料を給与すると，乳腺組織の発育を阻害すると報告している．Whitlock ら(2002)は，春機発動時期が早い高増体の育成雌牛に低タンパク質飼料を給与すると，乳腺発育を阻害するリスクが増加すると報告している．Silva ら(2002)は春機発動前の高増体育成は，乳腺組織の発達を直接阻害するのではなく，体重増加より体脂肪増加が乳腺組織の発達を阻害すると述べている．したがって，暑熱により育成前期雌牛の代謝が体脂肪蓄積に傾く場合は，乳腺発育の阻害，それに続く乳生産の低下が起こる可能性が示唆される．

3.1.5. 小括

環境温度が 20℃から 28℃に高まると，春機発動前の育成前期雌牛の採食量，増体量は変わらないが，摂取したエネルギーは体タンパク質ではなく体脂肪として蓄積した．飼料の消化率は 33℃では 20℃や 28℃と比較して高かったが，採食量，増体量，さらに体タンパク質蓄積は低下した．育成前期雌牛における高温によるエネルギー・N 代謝，生理応答への負の影響は，28℃ではほとんどなく，33℃以上で顕著に現れることが示唆された．

3.2. 育成前期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす高湿度の影響（実験 2b）

3.2.1. 目的

実験 1b では，春機発動前のホルスタイン種育成前期雌牛に及ぼす環境温度の影響を検討し，RH60%においては，1)環境温度 28℃では，潜熱放散，および顕熱放散が上手く機能し，体温上昇は認められず，乾物摂取量や増体量の低下が認められないこと，2)環境温度 33℃では，体温上昇および乾物摂取量の低下傾向が認められ，また蓄積エネルギーは体タンパク質としてではなく体脂肪として蓄積するという結果を示した．

高温環境下では，高湿度もウシの生産性への負の影響をもたらす大きな要因の 1 つである(Bianca 1962; 三村ら 1971)が，高温環境下の育成雌牛に及ぼす高湿度の影響を生理応答，物質出納の両面から詳細に検討した報告はない．そこで本研究 3 章 2 節では，高温環境下において，RH を 80%まで高めた場合に，育成前期乳牛の生理応答，飼養成績，そして窒素・エネルギー代謝および体蓄積配分に及ぼす影響を実験 2a に測定項目を追加して検討した．

3.2.2. 試験方法

3.2.2.1. 環境温湿度処理

環境条件は，実験 1b と同様環境温湿度を制御できる代謝実験棟に育成雌牛を収容し，RH を 80%に設定し，1 期 14 日間で環境温度を 1 期 20℃，2 期 28℃および 3 期 33℃80%の 3 処理とした．ただし，3 期 33℃では RH を 80%まで高めることは設備能力上困難であったため，実際の RH は 70%となった．

3.2.2.2. 供試動物および供試飼料

実験には，第一胃にカニューレを装着したホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭(第 1 期(20℃)実験開始時の平均体重 259 ± 20 kg,平均月齢 10.4 ± 1.0 カ月)を供試した．供試飼料は，イタリアンライグラスサイレージ，アルファルファヘイキューブ，配合飼料とし，乾物で 45 : 5 : 50 の割合で給与した．供試飼料の組成と化学組成を表 3-9 に示した．給与した飼料全体としての CP および NDFom は，それぞれ 14.8%および 42.9%(表 3-9)であった．これら供試飼料への馴致は，一般管理牛舎において 1 ヶ月以上行った．

Table 3-9 Ingredients and chemical composition of diet fed to heifers

		Amount
Ingredient (% of total dietary DM)		
Italian ryegrass silage		44.7
Alfalfa hay cube		5.0
Concentrate pellet		50.3
(% of concentrate pellet, DM base)		
Corn		30.0
Barley		25.0
Wheat bran		9.0
Defatted rice bran		7.0
Soybean meal		11.7
Molasses		3.5
Alfalfa meal		7.0
Beet pulp		5.0
Calcium carbonate		1.2
NaCl		0.5
Minerals and vitamins supplement		0.1
Chemical composition		
OM	(% of DM)	92.0
CP	(% of DM)	14.8
EE	(% of DM)	2.0
NDFom	(% of DM)	42.9
NFC	(% of DM)	32.3
GE	(MJ/kgDM)	17.9

DM: dry matter
OM: organic matter
CP: crude protein
EE: ether extracts
NDFom: neutral detergent fiber
NFC: non fibrous carbohydrate
GE: gross energy

3.2.2.3. 代謝実験棟における飼養管理

育成雌牛は，供試飼料に馴致した後に，代謝実験棟に移動し，環境温度 20℃，RH60%でラバーマットを敷いた個別スタンチョンや開放型呼吸試験装置などの飼養施設に約 1 ヵ月かけて馴致し，設定した増体量 0.8kg/日に達したことを確認してから予備期を開始した．飼料給与量は，日本飼養標準(乳牛)2006 年版(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)に基づき DG0.8kg を満たす量とし，10:00 および 16:00 の 2 回に分けて給与し，翌日 9:30 に残飼を回収，計量した．飼料給与量は，実験処理期間の 42 日間を通して一定とした．水およびミネラルブロック(E100Z；日本全薬工業，郡山市)は自由摂取とした．実験は，農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所動物実験実施に関する要領に基づいて実施した．

3.2.2.4. 窒素・エネルギー出納試験およびサンプリング項目

各期 14 日間の後半 5 日間を本試験期とし，開放型呼吸試験装置において糞尿分離機を用いた全糞尿採取を行った．本試験期 5 日間のうち 4 日間は朝 10:00 から翌朝 9:30 までを 1 日とする呼吸試験も同時に行い，酸素消費量，二酸化炭素およびメタン発生量を 1 日の値に換算した．代謝試験の解析に必要となる給与飼料，残飼，糞，尿のサンプリングは，実験 1b と同様の方法で行った．

飲水量は，毎日 9:30 に飲水計により測定した．体重は，試験開始前および各試験期の 5,9,14 日目の 9:30 に測定し，各試験期の 9 日目と 14 日目を平均した値をその期の体重として示した．平均 DG は実験 1b と同様の方法で算出した．直腸温および呼吸数も実験 1b と同様に朝の飼料給与前に測定した．各試験期における最終日の朝の飼料給与前には，頸静脈からヘパリン入試験管に血液を，フィステルから第一胃内容液を採取し，実験 1b と同様の方法で保存した．

粗飼料および液相の全消化管における通過速度および平均滞留時間は，マーカー法(Hong ら 1988；大下ら 1995)を用いて測定した．具体的には，各試験期の 8 日目朝の給与直前に，塩化イッテルビウム($YbCl_3$)溶液で標識したイタリアンライグラス(イタリアンライグラス 100 g に対して Yb 0.84 g)を経口摂取させ，コバルト EDTA(Co-EDTA)溶液(500 mL 蒸留水に対して Co 1.27 g)をフィステルから投与した．Yb で標識した飼料の投与前，投与後 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 48, 60, 72, 84, 96 時間目に直腸から糞を採取し，Co 溶液の投与前，投与後 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 時間目にフィステルから第一胃内容液を採取した．

3.2.2.5. 分析項目

給与飼料，残飼および糞については，DM，CP，EE，灰分，NDFom およびエネルギー含量を測定し，尿については N および E 含量を実験 1b と同様の方法で測定した．非繊維性炭水化物(NFC)は有機物から NDFom，CP，EE を差し引いて求めた．

血漿中の総タンパク質(TP)，アルブミン，血中尿素態窒素(BUN)，アスパラギン酸トランスフェラーゼ(AST)，アラニンアミノトランスフェラーゼ(ALT)，グルコース，総コレステロール，トリグリセライド，ケトン体，アルカリフォスファターゼ(ALP)，カルシウム(Ca)および遊離脂肪酸(NEFA) を血液自動分析計(7250 型；日立ハイテク，東京)で測定した．トリヨードサイロニン(T_3)およびサイロキシン(T_4)は化学発光酵素免疫測定(CLEIA)法により測定した(依頼分析，三菱メディエンス株式会社，東京)．各試験期における最終日の朝に採取した第一胃内容液は，遠心分離(1870×g,15 分,4℃)し，その上清を用いてアンモニア態窒素濃度をインドフェノール法(Weatherburnm 1967)により測定した．

経時的に採取した直腸糞は，60℃で通風乾燥後，粉砕し，Hart と Polan (1984)の方法に従い，原子吸光分光光度計(AA-6800F 型；島津製作所，京都市)により Yb 濃度を測定した．経時的に採取した第一胃内容液は，Cameron ら(1991)の方法に従い，原子吸光分光光度計(AA-6400F 型；島津製作所，京都市)により Co 濃度を測定した．これらを Pond ら(1988)の two compartment model (GnG1model)にあてはめ，first compartment の滞留時間(CMRT1，通過可能なプールに入るまで微細化に要する時間)，second compartment の滞留時間(CMRT2，通過可能な分画の滞留時間)，第一胃内滞留時間(CMRT，CMRT1 と CMRT2 を加算したもの)，移行時間(TD)，および全消化管滞留時間(TMRT，CMRT に TD を加算したもの)を算出した．その際，固相マーカーとしての Yb は G_2G_1 モデルに最もよく当てはまり，これらで算出した値を採用した．液相については Cameron ら(1991)の方法に従い，回帰分析により，通過速度および滞留時間を算出した．また，経時的に採取した第一胃内容液の pH も測定した．

DE 摂取量，GE 摂取量，FE 排泄量，ME 摂取量，メタンの熱量は実験 1b と同様の方法で算出した．タンパク質および脂肪としての体蓄積量(g/日)も実験 1b と同様の方法で推定した．

3.2.2.6. 統計処理

全てのデータについて，SAS (2008)の GLM プロシジャにより温度処理の効果を分散分析し，有意差の認められたデータを対象に処理間差の検定を Tukey の多重検定により行った．

3.2.3. 結果

高湿度を伴った高温が育成前期雌牛の飼養成績に及ぼす影響を表 3-10 に示した．20℃時の体重は 270 kg であり，28℃および 33℃ではそれぞれ 283 kg および 279 kg であった．20℃時と比べて 28℃および 33℃では, 体温はそれぞれ 1.3℃および 2.1℃上昇し(P< 0.05), 呼吸数はそれぞれ 57 回および 73 回有意に増加した(P< 0.05)．飲水量は環境温度処理間で差はなかった．DMI は，20℃時を 100%とした場合，それぞれ 28℃で 75%および 33℃で 50%と有意に低下した(P< 0.05). 特に粗飼料 DMI の低下が著しく, 20℃時の DMI を 100%とした場合，28℃では 48%，33℃では 22%低下した(P< 0.05)．消化率は 20℃と比べて，DM および OM では 33℃で有意に増加し(P< 0.05)，CP および EE では 28 および 33℃で有意に増加し(P < 0.05)，NFC では 28℃，33℃と環境温度が高まるにつれ有意に増加したが(P< 0.05)，NDFom では環境温度処理間差を認めなかった．

Table 3-10 The effects of high environmental temperature on physiological status, feed intake, feed digestibility and daily gain of heifers

		Environmental temperature			SEM	Probability
		20°C	28°C	33°C		
Body weight	(kg)	270.0^{b}	282.7^{a}	279.0^{a}	1.8	0.007
Average daily gain	(kg/day)	0.899^{a}	0.759^{a}	- 0.313^{b}	0.175	0.005
Rectal temperature	(°C)	38.9^{c}	40.2^{b}	41.1^{a}	0.1	< 0.001
Respiration rate	(times/min)	41.3^{c}	97.8^{b}	113.8^{a}	3.6	< 0.001
Water intake	(L/day)	24.4	23.9	21.5	1.7	0.483
Total DMI	(kg/day)	6.0^{a}	4.5^{b}	3.0^{c}	0.3	0.001
Concentrate intake	(kg/day)	3.2	3.1	2.4	0.2	0.039
Italian ryegrass silage intake	(kg/day)	2.6^{a}	1.1^{b}	0.4^{b}	0.2	< 0.001
Alfalfa hay cube intake	(kg/day)	0.3	0.3	0.2	0.1	0.163
DM digestibility	(%)	69.0^{b}	73.5^{ab}	77.5^{a}	1.1	0.004
OM digestibility	(%)	71.1^{b}	75.6^{ab}	79.9^{a}	1.1	0.004
CP digestibility	(%)	61.7^{b}	71.2^{a}	72.7^{a}	1.1	0.004
NDFom digestibility	(%)	57.2	54.0	57.5	1.9	0.400
EE digestibility	(%)	72.6^{b}	80.9^{a}	81.4^{a}	1.4	0.008
NFC digestibility	(%)	91.9^{c}	94.3^{b}	96.3^{a}	0.4	0.001

SEM: standard error of the mean
Body weight: average of day 9 and day 14 of each experiment
DMI: dry matter intake
DM: dry matter
NDFom: neutral detergent fiber
NFC: non fibrous carbohydrate
^{abc} Means in a row with different superscripts differ significantly (P<0.05).

高湿度を伴った高温環境が育成前期雌牛の飼料における消化管内容物の通過速度に及ぼす影響を表 3-11 に示した．固相の CMRT2, CMRT および TMRT は 20℃および 28℃と比較して 33℃では有意に増加した($P < 0.05$)．固相の CMRT1 および TD に処理温度間における差は認められなかったが，固相の通過速度は環境温度の上昇にともない有意($P<0.05$)に低下した($P < 0.05$)．液相の CMRT は 20℃および 28℃と比較して，33℃では有意に低下し，TMRT は 33℃で有意に増加した($P < 0.05$)．

Table 3-11 The effects of high environmental temperature on passage rate of feed in heifers

		Environmental temperature			SEM	Probability
		20°C	28°C	33°C		
Forage marked with Yb						
CMRT1	(h)	8.9	10.2	12.5	1.4	0.718
CMRT2	(h)	36.8^{b}	67.0^{b}	148.5^{a}	10.3	< 0.001
CMRT	(h)	45.8^{b}	77.2^{b}	161.1^{a}	10.8	< 0.001
TD	(h)	8.3	8.8	8.0	0.9	0.846
TMRT	(h)	54.1^{b}	86.0^{b}	169.1^{a}	11.0	< 0.001
Rate constant of ruminal passage of feed	(%/h)	2.75^{a}	1.61^{b}	0.72^{c}	0.13	< 0.001
Liquid marked with Co						
Rate constant of ruminal passage of liquid	(%/h)	9.3^{a}	7.5^{a}	3.5^{b}	0.5	< 0.001
Retention time of liquid	(h)	11.1^{b}	14.7^{b}	29.7^{a}	1.7	< 0.001

SEM: standard error of the mean
CMRT1: Mean retention time in the first compartment
CMRT2: Mean retention time in the second compartment
CMRT: Compartmental mean retention time (CMRT1+CMRT2)
TD: Time Delay
TMRT: Total digestion treat mean retention time (CMRT+TD)
^{abc} Means in a row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

高湿度を伴った高温環境が育成前期雌牛の血液性状に及ぼす影響を表 3-12 に示した．環境温度が高まるにつれ，BUN は有意に増加したが($P < 0.05$)，ALT，グルコース，総コレステロール，ALP，Ca および T_3 は有意に低下した($P < 0.05$).

Table 3-12 The effects of high environmental temperature on blood composition of heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Total protein	(mg/mL)	67.2	68.0	68.4	0.7	0.532
Albumin	(mg/mL)	36.8	37.6	36.6	0.7	0.593
Urea nitrogen (BUN)	(ng/mL)	103.0^{b}	177.1^{a}	193.5^{a}	5.1	< 0.001
Aspartate aminotransferase (AST)	(IU/L)	59.5	59.9	74.4	6.0	0.216
Alanine aminotransferase (ALT)	(IU/L)	20.3^{a}	14.9^{b}	10.8^{c}	0.7	< 0.001
Glucose	(mg/100mL)	92.9^{a}	76.1^{b}	70.2^{b}	1.9	< 0.001
Total cholesterol	(mg/100mL)	82.5^{a}	67.2^{b}	46.8^{c}	2.8	< 0.001
Triglyceride	(mg/100mL)	16.6	19.3	14.1	2.6	0.413
Total ketone bodies	(umol/L)	238	292	274	20	0.228
Alkaline Phosphatase (ALP)	(IU/L)	431^{a}	162^{b}	78^{b}	24	< 0.001
Ca	(mg/L)	9.71^{a}	9.11^{ab}	8.80^{b}	0.06	0.010
Non-esterified fatty asid (NEFA)	(umol/L)	97	81	179	48	0.369
Triiodothyronine (T_3)	(ng/mL)	1.57^{a}	1.00^{b}	0.72^{c}	0.06	0.001
Thyroxine (T_4)	(ng/mL)	72.3	74.5	76.0	3.4	0.743

SEM: standard error of the mean

^{abc}Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高湿度を伴った高温環境が育成前期雌牛の第一胃内容液性状に及ぼす影響を表 3-13 に示した．pH は環境温度の増加にともない有意に低下した($P < 0.05$)．アンモニア態窒素濃度は 20, 28, 33℃の順に 7.3, 13.7, 18.3 mg/dL であり，20℃と比較して 28℃以上で有意に増加した($P < 0.05$)．揮発性脂肪酸における酢酸割合は 20℃と比較して 28℃および 33℃で低下した($P < 0.05$)．プロピオン酸および吉草酸割合は，温度処理間で差はなかった．酪酸割合は，20℃と比較して 28℃および 33℃で増加した($P < 0.05$)．酢酸プロピオン酸比(AP 比)に温度処理間差は見られなかった．

Table 3-13 The effects of high environmental temperature on rumen fermentation parameters in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
pH		7.3[a]	7.1[b]	6.9[c]	0.2	
NH_3-N	(mg/dL)	7.26[b]	13.69[a]	18.25[a]	1.16	0.002
Total VFA	(mmol/L)	77.8	79.9	62.6	9.1	0.398
Acetic acid	(mol%)	71.6[a]	67.7[b]	66.3[b]	0.8	0.007
Propionic acid	(mol%)	16.1	15.2	16.1	0.5	0.388
Butyric acid	(mol%)	9.4[b]	13.3[a]	13.5[a]	0.5	0.001
Valeric acid	(mol%)	2.8	3.8	4.0	0.3	0.085
Acetic : Propionic		4.5	4.5	4.1	0.2	0.393

SEM: standard error of the mean

[abc]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高湿度を伴った高温環境が育成前期雌牛の N 出納に及ぼす影響を表 3-14 に示した. N 摂取量は，20℃および 28℃時と比較して 33℃では有意に低下した($P< 0.05$).代謝体重あたりでは，N 摂取量，糞への N 排泄量および体蓄積 N 量は，環境温度が高まるにつれて有意に低下した($P< 0.05$)．また N 摂取量あたりでは，20℃時と比較して 28℃および 33℃において糞への N 排泄割合は有意に低下したが($P< 0.05$), 尿への N 排泄割合は有意に増加した($P < 0.05$).

Table 3-14 The effects of high environmental temperature on nitrogen utilization in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Nitrogen intake	(g/day)	137.5[a]	123.6[a]	80.6[b]	7.6	0.004
Fecal nitrogen	(g/day)	52.6[a]	35.8[b]	22.5[b]	3.1	0.001
Urinary nitrogen	(g/day)	41.5[b]	68.5[a]	56.9[a]	2.8	0.002
Retained nitrogen	(g/day)	43.5[a]	19.3[b]	1.2[c]	2.6	< 0.001
CP digestibility	(%)	61.7[b]	71.2[a]	72.7[a]	1.1	< 0.001
Nitrogen intake	(g/day/$BW^{0.75}$)	2.066[a]	1.800[a]	1.188[b]	0.096	0.002
Fecal nitrogen	(g/day/$BW^{0.75}$)	0.791[a]	0.523[b]	0.334[c]	0.038	< 0.001
Urinary nitrogen	(g/day/$BW^{0.75}$)	0.618[b]	0.993[a]	0.835[a]	0.041	0.002
Retained nitrogen	(g/day/$BW^{0.75}$)	0.657[a]	0.284[b]	0.019[c]	0.035	< 0.001
Fecal nitrogen	(% of intake)	38.3[a]	28.8[b]	27.3[b]	1.1	< 0.001
Urinary nitrogen	(% of intake)	29.9[b]	56.0[a]	74.4[a]	4.6	0.001
Retained nitrogen	(% of intake)	31.8[a]	15.3[ab]	- 1.7[b]	4.0	0.003

SEM: standard error of the mean
[abc]Different superscripts in the same row indicate significant differences (P<0.05).

高湿度を伴った高温環境が育成前期雌牛のエネルギー出納に及ぼす影響を表 3-15 に示した. GE 摂取量, DE 摂取量, ME 摂取量は環境温度が増加するにつれ有意に低下し($P < 0.05$), 33℃では RE は負となった．代謝体重あたりでは，HP および RE は環境温度の増加にともない有意に低下し($P < 0.05$)，33℃では RE は負であった．GE 摂取量あたりでは，20℃時と比較して 33℃では，糞への排泄割合は有意に低下したが($P < 0.05$)，尿，メタンおよび HP の割合は有意に増加した($P < 0.05$).

Table 3-15 The effects of high environmental temperature on energy utilization in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Gross energy intake (GEI)	(MJ/day)	108.0^{a}	81.0^{b}	53.7^{c}	5.5	0.001
Digestible enegy intake (DEI)	(MJ/day)	73.6^{a}	58.8^{b}	41.0^{c}	3.4	0.002
Metabolizable energy intake (MEI)	(MJ/day)	62.7^{a}	48.3^{b}	33.0^{c}	2.9	0.001
Gross energy intake	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	1.622^{a}	1.180^{b}	0.793^{c}	0.067	< 0.001
Fecal energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.517^{a}	0.324^{b}	0.188^{c}	0.027	< 0.001
Urine energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.045^{ab}	0.052^{a}	0.042^{b}	0.002	0.041
Methane energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.119^{a}	0.101^{a}	0.075^{b}	0.005	0.003
Heat production	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.731^{a}	0.612^{b}	0.542^{c}	0.016	< 0.001
Retained energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.211^{a}	0.091^{b}	- 0.055^{c}	0.021	< 0.001
Fecal energy	(% of GEI)	31.9^{a}	27.0^{ab}	23.0^{b}	1.2	0.006
Urinary energy	(% of GEI)	2.8^{b}	4.5^{a}	5.6^{a}	0.3	0.002
Methane energy	(% of GEI)	7.3^{b}	8.6^{a}	9.7^{a}	0.2	0.001
Heat production	(% of GEI)	45.1^{b}	52.2^{b}	71.5^{a}	4.3	0.012
Retained energy	(% of GEI)	13.0^{a}	7.6^{a}	-9.7^{b}	3.8	0.013
Digestibility (DEI/GEI)	(%)	68.2^{b}	73.0^{ab}	77.1^{a}	1.2	0.006
Metabolizability (MEI/GEI)	(%)	58.1^{b}	59.9^{ab}	61.8^{a}	0.7	0.032

SEM: standard error of the mean

^{abc}Different superscripts in the same row indicate significant differences (P<0.05).

N および E 出納の結果から脂肪とタンパク質への体組織蓄積配分を試算し，高湿度を伴った高温環境が育成前期雌牛の体内配分に及ぼす影響を表 3-16 に示した．脂肪としての体蓄積量は，20℃および 28℃と比べ 33℃で有意に減少し($P < 0.05$)，負の蓄積，すなわち体脂肪の動員が認められた．一方，タンパク質としての体蓄積は，環境温度の増加にともない有意に低下したものの($P < 0.05$)，33℃においても負の値を示さなかった．

Table 3-16 The effects of high environmental temperature on energy distribution in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Retained energy	(MJ/day)	14.08[a]	6.25[b]	-3.85[c]	1.64	< 0.001
as fat	(MJ/day)	7.60[a]	3.38[a]	-4.02[b]	1.42	0.003
as protein	(MJ/day)	6.48[a]	2.88[b]	0.18[c]	0.38	< 0.001
Retained body composition						
as fat	(g/day)	193.3[a]	86.0[a]	-102.5[b]	36.2	0.003
as protein	(g/day)	271.6[a]	120.5[b]	7.3[c]	16.1	< 0.001
fat : protein	(ratio of weight)	0.73	0.85	-2.13	1.19	0.217

SEM: standard error of the mean
[abc]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

3.2.4. 考察

3.2.4.1. 体温，呼吸数および血液性状

体温および呼吸数は暑熱ストレスの程度を測る上で有効な指標とされている(Brown-Brandil ら 2006)．RH を 80%まで高めた本実験の場合，28℃では体温 40.2℃，呼吸数 98 回/分と 20℃時と比較して呼吸数は倍増し，33℃ではさらに体温が 1℃上昇し，呼吸数も 114 回/分まで増加した(表 3-10)． RH を 60%に設定した実験 1b では，体温および呼吸数は 28℃でそれぞれ 39.1℃，56 回/分，33℃でそれぞれ 40.1℃，91 回/分であり，同じ温度で比較すると本実験の方が体温は高く呼吸数は多かった. 塩谷ら(1997)はホルスタイン種の育成雌牛と乾乳牛を用いた実験において，暑熱環境では熱放散全体に占める顕熱放散の割合が低下し，代わりに呼気や体表面からの水分蒸散による潜熱放散の割合が高まること，またその潜熱放散量は RH が高まると低下することを示した．これらのことから，本実験における高温時の体温が実験 1b と比べて高かったのは，RH60%では呼吸数増加による潜熱放散が上手く機能し体温の上昇が抑制されたが，RH80%では呼吸数を増加させても潜熱放散を十分行うことが出来ず，熱放散の全体量が低下し，体温の上昇を抑制できな

かったと考えられた.

暑熱環境の負荷を表す指標として Johnson(1980)の温湿度指数(THI；THI＝乾球温度＋0.36×露点温度＋41.2) が泌乳牛ではよく用いられており，72 以上で乳量の低下が始まると報告されている(Armstrong 1994；Ravangnolo ら 2000)．また，近年では，日内で THI が 68 を越えると起立行動が影響を受け，深部体温を下げるために起立時間が長くなるという報告もある(Allen ら 2015).

暑熱下でのホルスタイン種育成雌牛の体温や呼吸数を調べた実験において，THI を Johnson(1980)の式で計算した場合，THI が 88 で直腸温・呼吸数は 40.3℃・104 回/分(Kellaway と Colditz 1975), THI が 87 で 39.8℃・82 回/分(Colditz と Kellaway 1972)，THI が 85 で 39.9℃・101 回/分(Marai ら 1995)，THI が 83 で 40.1℃・91 回/分(実験 1b)，同じく 83 で 39.8℃(Bernabucci ら 1999)，THI が 79 で 39.8℃・84 回/分(Nardone ら 1997)であった．本実験 2b の THI は，28℃RH80%で 78，33℃RH70%で 84 と，外部環境からの熱負荷は既往の報告と同程度と考えられたが，それぞれの THI において体温は 40.2℃および 41.1℃であり，呼吸数は 98 回/分および 114 回/分と既往の報告と比べ高い値であった．これは，本実験における育成雌牛の DG が既往の報告より高く，また，乾物摂取量も多いため熱発生量が多く，ウシの体内からの熱負荷が既往の報告より大きくなり，暑熱環境の影響を受けやすかったことが考えられる．また，既往の報告では高温時の RH が 40～60%と本実験より低かったことから，潜熱放散量の抑制が少なかった（塩谷ら 1997）と考えられる．さらに，気温と湿度の影響が同等である THI(Johnson 1980)では，高温環境時における高湿度の影響が数値に十分反映しない可能性もある．したがって，日本の夏季の様な高温多湿が育成雌牛の体温や呼吸数，増体に及ぼす影響をより良く推定するためには，指標となる温湿度指数の見直しも含めて今後の検討が必要と考えられる.

本実験 2b において，BUN は 20℃と比べ 28 および 33℃で有意に上昇したが，血中総コレステロール，グルコース，Ca，ALT， ALP および T_3 濃度は高温時に低下した(表 3-12). 暑熱下の反すう家畜では N 摂取量の低下を反映し BUN は低下すると報告されている(Shaffer ら 1981；Marai ら 1995；Abeni ら 2007)．一方，N 摂取量は同程度または低下しても BUN は増加するとの報告もあり(White ら 1992；寺田ら 1999；Obitsu ら 2011)，その理由としてはタンパク質合成の低下および分解の促進(White ら 1992)，肝臓でアンモニア態窒素から合成された尿素の血液から消化管への移行量の低下(Obitsu ら 2011)が挙げられている．本実験では N 摂取量は 20℃と比べて 28℃でわずかに低下，33℃で有意に低下したが, 第一胃内容液のアンモニア態窒素濃度および尿中 N 排泄量は, 20℃と比較して 28℃以上で有意に増加し，N 蓄積量は有意に減少していたことから，高温時の BUN の増加はタ

ンパク質合成の低下や分解の促進により増加したと考えられた．総コレステロール濃度の低下は，DMI 低下に起因する養分摂取量の不足，肝臓でのコレステロール合成の低下，末梢組織での利用増加(Shaffer ら 1981 ; Abeni ら 2007) に起因すると考えられた．グルコース濃度の低下は，養分摂取量の不足(De Renis と Scaramuzzi 2003；Abeni ら 2007)に加え，呼吸活動を支えるエネルギー源(Shaffer ら 1981 ; Wheelock ら 2010)としての利用増加，また，糖新生低下(Abeni ら 2007)の結果と考えられた．

環境温度の上昇にともない，体温調節機構を担う甲状腺ホルモン分泌が低下することは泌乳牛ではよく知られている(Alnaimy ら 1992)．また，5 ヵ月齢のホルスタイン種育成雌牛では暑熱下の T_3 濃度は DG と正の相関があり(Baccari ら 1983)，ヒツジでは甲状腺ホルモンは栄養状態の指標となりうる(Todini ら 2007)との報告がある．さらに，ヒツジに風を当てて暑熱ストレスを軽減した場合，T_3 濃度は上がり，DG は 15%増える(Koluman と Daskiran 2011)との報告がある．本実験の育成雌牛においても，T_3 濃度は既往の成果と同様に高温時に DG の減少とともに低下した．暑熱下の乳牛における ALP 活性の低下はいくつか報告されており(Shaffer ら 1981 ; Abeni ら 2007)，その理由として Abeni ら(2007)は暑熱環境およびエネルギー代謝の変化に順応して，肝臓や腸での活性が低下しているためと考察し，暑熱環境下の乳牛において ALP 活性は迅速かつ正確な暑熱ストレス指標であると指摘している．本実験の T_3 濃度および ALP 活性は 20℃に比べて 33℃では半分以下まで低下しており，養分充足率は低く，暑熱負荷の程度はかなり過酷であったと判断し得た．

また RH80%とした本実験では，BUN は 20℃と比べ 28 および 33℃で有意に上昇し，血中総コレステロール，グルコースおよび T_3 濃度は 20℃と比べ 28 および 33℃で有意に低下した．一方，RH60%とした実験 1b では，BUN の有意な上昇およびグルコースおよび T_3 濃度の有意な低下は 20℃と比べて 28℃では認められず，33℃で認められた．また実験 1b では，血中総コレステロール濃度には有意差を認めなかった．これらのことから，これらの血液性状に及ぼす高温の影響についても，体温および呼吸数と同様に RH の影響を大きく受けることが示された．

以上のことから，環境温度 20℃における DG が 0.9kg 程度の育成前期雌牛において，28℃ RH60%の暑熱環境下では，体温，呼吸数および血液性状への影響は認められないが，28℃ RH80%では有意に負の影響を受けることが明らかとなった．

3.2.4.2. 体重，飲水量，飼料消化率および消化管通過速度

環境温度の上昇にともない，採食量および増体量が低下することはよく知られている．高温環境下での相対湿度の上昇による生産性への影響はより著しく，RH80%の本実験にお

ける 33℃では DMI が半減し，体重も減少に転じ，DG は負の値を示した．Colditz と Kellaway(1972)は適温環境下(17℃RH70%)と比較して暑熱環境下(38℃RH40%)では，ホルスタイン種育成雌牛の飼料摂取量は 14%の低下であっても，そのときの DG は 50%の低下であったと報告している．また，RH60%とした実験 1b では，飼料摂取量および DG とも 20℃と 33℃との間に有意差はなく，本実験の環境温湿度 33℃RH70%は維持に必要な栄養素量も摂取できないほど，育成前期雌牛にとって厳しい高温負荷であったと考えられた．

RH80%の本実験 2b において，環境温度は飲水量に影響しなかったが，乾物摂取量あたりの飲水量は 20℃, 28℃, 33℃で 4.0, 5.3, 7.3L/日と環境温度の上昇にともない増加した．一方 RH60%とした実験 1b では，高温時に乾物摂取量の大きな低下を認めず，飲水量は有意に増加したが，乾物摂取量あたりの飲水量は 20℃，28℃，33℃で 4.2，5.2，7.4L/日であり，本実験の結果と良く一致した．飲水量に及ぼす暑熱の影響は，乾物摂取量の低下程度に影響されるが，DMI あたりの飲水量は多数の報告(Kellaway と Colditz 1975 ; Kurihara ら 1989 ; Nardone ら 1997 ; Bernabucci ら 1999)において暑熱時に増加しており，高温高湿時に乾物摂取量が減少した本実験においても同様であった．

RH80%の本実験 2b において，環境温度が高まるにつれ DM, OM, CP, EE, NFC 消化率は増加し，飼料の通過速度は 20℃と比べ 28℃および 33℃で有意に低下した．暑熱環境下において飼料の消化率が増加する理由として，飼料の消化管内滞留時間の増加(Warren ら 1974 ; Schneider ら 1988), 配合飼料と比べて相対的に消化性の低い粗飼料の摂取量低下(栗原ら 1992)，高品質飼料の給与(Shibata と Mukai 1979 ; 栗原ら 1992 ; 農業・食品産業技術総合研究機構 2007)等が考えられる．本実験では，イタリアンライグラスサイレージの品質が低質(CP 10.0%, NDFom 67%)であったため，暑熱負荷のかかる 28℃および 33℃においては残飼が多かった．そのため，飼料摂取量に占めるイタリアンライグラスサイレージの割合が低下し，高温時には飼料の消化管通過速度が低下した．これらのことから，RH80%の本実験 2b における飼料消化率の増加は，摂取飼料中の配合飼料割合の増加および飼料の消化管内滞留時間の増加が関係していると考えられた．

一方， Bernabucci ら(1999)は，10 ヵ月齢のホルスタイン種育成雌牛を用いた実験から短期(20 日間)の暑熱負荷では消化率は増加するが，長期(40 日間)では，消化率は適温時と比較して差がなくなると報告している．その時の飼料の第一胃内通過速度が低下し続けたことから，長期的な暑熱下では DM 消化率と飼料の通過速度は関係なく，飲水量増加による第一胃内容物の希釈，唾液生産量や消化管運動の低下，第一胃内のセルロース分解菌活性の低下等が DM 消化率に負の影響を及ぼすと考察している．本実験 2b では，高温時に飲水量の増加は認められず，また本実験 2b の第一胃内容液の微生物叢を検討した Tajima ら

(2007)の報告で，20℃と比べて 28℃および 33℃では，門レベルで検出される微生物叢は異なり，Bacteroidetes に属する菌が多く検出されたが，セルロース分解菌叢の変化については明確ではなかった．これらのことから本実験の高温高湿時においては，暑熱負荷期間を長期とした Bernabucci らの報告(1999)で示された消化率に対する微生物活性への明確な負の影響要因は認められず，消化管通過速度の低下時に消化率の増加を示したと考えられた．しかし，本実験の高温高湿負荷期間は 1 期 14 日であったことから，温暖化の進行による暑熱環境がさらに長期化することも念頭におくと，育成雌牛の消化率と消化管通過速度の関係については長期的な視点からの検討が必要と考えられた．

3.2.4.3. 窒素およびエネルギー代謝

暑熱環境下では，尿への N 排泄量が増加することが泌乳牛や肥育牛を用いた実験で報告(White ら 1992; 寺田ら 1999 ; Obitsu ら 2011)されており，育成前期雌牛を用いた本実験においても，20℃と比べて高温環境下では尿への N 排泄量が増加することが示された．Obitsu ら(2011)は，泌乳牛で尿素態窒素の動態を調べ，暑熱下では N 摂取量あたりの肝臓における尿素合成量は増加するが，血液から消化管への尿素移行率は低下するため，BUN 濃度は上昇し，腎臓から尿としての N 排泄量が増加すると述べている．また RH80%とした本実験の高温環境下では, N 摂取量が減少する一方で BUN 濃度および第一胃内容液中のアンモニア態窒素濃度が増加しており，高温環境下における N 蓄積量低下には N 利用率低下も関係していると考えられた．

尿への N 排泄量および摂取 N 量に対する N 排泄量の割合の増加は，RH60%とした実験 1b では 20℃および 28℃と比べ 33℃で有意に高まったが, RH80%とした本実験では，20℃と比べて 28℃および 33℃で有意に高まった．その結果，RH60%では N 蓄積量は 33℃のみ有意に低下したのに対し，RH80%では 28℃および 33℃で有意に低下した．これらのことから，高温時の N 利用性は RH に大きく影響されることが示唆された．

窒素およびエネルギー出納から脂肪とタンパク質への体組織蓄積配分を試算したところ，脂肪としての体蓄積量は，20℃および 28℃と比べ 33℃で有意に減少し，負の蓄積，すなわち体脂肪の動員が認められた．一方，タンパク質としての体蓄積は，環境温度の増加にともない有意に低下したものの，33℃においても負の値を示さなかった．つまり，高温時において摂取エネルギーが維持量を満たさない場合には，体タンパク質よりも体脂肪が優先して動員されていると考えられた．本実験においても，33℃の NEFA 濃度は 20℃および 28℃に比べて 2 倍程度上昇した値であったが, 有意差は認められなかった. 暑熱下で NEFA の上昇が見られない報告はいくつかあり(泌乳牛では Flamenbaoum ら 1995(THI 78) ;

Abeni ら 2007(日平均 THI が 70~75) ; Wheelock ら 2010, 育成雌牛では Itoh ら 1998(30℃ 60%)), Abeni ら(2007)は肝臓および末梢組織で NEFA の利用が増加するため, Wheelock ら(2010)は, 脂肪酸の β-酸化は炭水化物の異化に比べて熱産生が小さく, 暑熱下では NEFA が優先して利用されているためなど, NEFA の生産より利用の方が大きいことがその理由として考えられている. 湿度との関係を指摘した報告はなかったためその関連は明確ではないが, 負のエネルギーバランスが認められた RH80%の本実験においても同じ理由で NEFA の有意な上昇が見られなかったと考えられた.

一方, 実験 1b では, 33℃において体タンパク質蓄積量は有意に低下したが, 体脂肪蓄積量は変化せず, DG も約 0.9kg と高く, 本実験 2b の結果とは一致しなかった. RH60%33℃において, BUN 濃度や尿中 N 排泄量は増加しており, 窒素代謝には変化を認めた. これらのことから, 環境温度 RH60%33℃の様にエネルギー蓄積に影響しない高温環境においても窒素代謝は影響を受け, その結果として体タンパク質蓄積量が減少すると考えられた. しかし, 摂取エネルギー量が維持量以下で体重減少をともなうような過酷な暑熱環境下である RH80%33℃の育成前期雌牛では, 体タンパク質よりもエネルギー価の高い体脂肪が優先して動員されると考えられた. また育成前期は, 体脂肪と比べて体タンパク質の蓄積が相対的に多い時期である(ARC 1980)ことから, 体蓄積ができない条件下では, 体タンパク質の減少を相対的に少なくする様な体内代謝の変化が起きていることが示唆された. しかし, 育成期の体蓄積はタンパク質が主であると考えると, 動員できる体脂肪量は少なく, 厳しい暑熱環境が長期に継続する場合には体タンパク質も動員されると考えられ, どのような条件で体タンパク質の動員が認められるかについて更なる検討が必要である.

以上の結果より, 体重 250kg 程度の育成前期雌牛に対する高温の影響は, 28℃RH60%では呼吸数の増加, 体温上昇のみに現れたが, 28℃RH80%ではそれらに加え血液性状の変化, 飼料およびエネルギー摂取量の減少, 窒素蓄積量, エネルギー蓄積量および DG の減少にも現れた. このような湿度の影響は 33℃では更に大きくなることが明らかとなった. そのため, RH の日平均が 70~80%を超える日の多い日本の夏季において, 酪農現場で暑熱の影響を考える場合には, 気温だけではなく湿度についても十分に注意を払う必要があることが改めて確認された.

3.2.5. 小括

高温高湿が育成前期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす影響を明らかにするために, ホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭を用い, RH を 80%一定に保ち, 環境温度を 20, 28, 33℃とした実験を行った. その結果, 体温および呼吸数は環境温度の上昇と

ともに有意に増加した．乾物摂取量は 28℃から有意に低下する一方，栄養素消化率は高まった．20 および 28℃ではタンパク質よりも脂肪の蓄積エネルギー量の方が多かったが，33℃では脂肪蓄積エネルギー量のみ負となった．以上の結果より，RH80%では，育成前期乳牛に及ぼす高温の影響は 28℃から認められ，33℃ではさらに大きくなることが示された．

3.3. 育成後期雌牛の生理応答および窒素・エネルギー代謝に及ぼす高温の影響（実験 3b）

3.3.1. 目的

実験 1b および 2b により，体重 250kg 程度のホルスタイン種育成前期雌牛の生理応答，窒素およびエネルギー代謝に及ぼす環境温度(20，28 および 33℃)および RH(以下 RH，60 および 80%)の影響を検討し，高温の影響は，RH60%28℃では呼吸数の増加のみに現れること，また，RH80%28℃では加えて体温の上昇，血液性状の変化，飼料およびエネルギー摂取量の減少，窒素蓄積量，エネルギー蓄積量および増体量の減少にも現れること，33℃では各測定項目に及ぼす湿度の影響がさらに大きくなることを示した．

体重の小さい動物の体重あたりの体表面積は，体重の大きい動物に比較して大きいため，熱放散に有利(三村 1980)とされ，体重が重いほど強く暑熱の負の影響を受けること(堀 1981)が知られている．そのため，成牛と比較して体重あたりの体表面積が大きい育成雌牛は，体重あたりの熱放散量が大きく暑熱環境に強いと考えられる．しかし，育成後期雌牛では体格が成牛に近づくため，育成後期雌牛に及ぼす RH60%下における高温の影響は，育成前期雌牛とは異なる可能性がある．しかし，育成後期雌牛に及ぼす環境温度の影響を詳細に検討した研究は，現在までほとんどなされていない．

そこで本実験では，育成後期雌牛に 20℃において DG0.8kg を満たす飼料を給与し，異なる環境温度(RH は 60%)における生理応答，飼養成績，血液性状，窒素およびエネルギー代謝の様相を実験 3a に測定項目を追加して明らかにし，実験 1b および 2b の結果と比較検討した．

3.3.2. 試験方法

3.3.2.1. 環境温湿度処理

実験環境条件は，環境温湿度を制御できる代謝実験棟(畜産草地研究所，茨城県つくば市；岩崎ら 1982)に育成雌牛 4 頭を収容し，RH を 60%一定とし，1 期 14 日間で環境温度を 1 期目 20℃，2 期目 28℃および 3 期目 33℃と順次温度を上げる処理とした．

3.3.2.2. 供試動物および供試飼料

実験には，第一胃にカニューレを装着したホルスタイン種育成後期雌牛 4 頭(実験開始時の平均体重 418 ± 14 (±標準誤差)kg,平均月齢 17.1 ± 0.5 ヵ月，非妊娠)を供試した．供試飼料は，イタリアンライグラスサイレージおよび配合飼料とし，乾物で約 1：1 の割合で給与した．実際に給与した時の供試飼料の給与割合および配合飼料の組成および化学組成を表 3-17 に示した．給与した飼料全体としての CP および NDFom は，それぞれ 15.8%およ

び 40.2%(表 3-17)であった．これら供試飼料への馴致は，一般管理牛舎において 2 週間行った．

Table 3-17 Ingredients and chemical composition of diet fed to heifers

		Amount
Ingredient (% of total dietary DM)		
Italian ryegrass silage		47.8
Concentrate pellet		52.2
(% of concentrate pellet, DM base)		
Corn		30.0
Barley		25.0
Wheat bran		9.0
Defatted rice bran		7.0
Soybean meal		11.7
Molasses		3.5
Alfalfa meal		7.0
Beet pulp		5.0
Calcium carbonate		1.2
NaCl		0.5
Minerals and vitamins supplement		0.1
Chemical composition		
OM	(% of DM)	92.0
CP	(% of DM)	15.8
EE	(% of DM)	2.7
NDF	(% of DM)	40.2
NFC	(% of DM)	33.6
GE	(MJ/kgDM)	18.5

DM: dry matter
OM: organic matter
CP: crude protein
EE: ether extracts
NDFom: neutral detergent fiber
NFC: non fibrous carbohydrate
GE: gross energy

3.3.2.3. 代謝実験棟における飼養管理

育成雌牛は，供試飼料に馴致した後に，代謝実験棟に移動し，環境温度 20℃，RH60%でラバーマットを敷いた個別スタンチョンおよび開放型呼吸試験装置などの飼養施設に 1 ヵ月かけて馴致し，DG が設定した 0.8kg/日に達したことを確認してから実験を開始した．飼料給与量は，日本飼養標準(乳牛)2006 年版(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)に基づき DG0.8kg を満たす量とし，10:00 および 16:00 の 2 回に分けて給与し，翌日 9:30 に残飼を回収，計量した．飼料給与量は，試験処理期間の 42 日間を通して一定とした．水およびミネラルブロック(E100Z ; 日本全薬工業,郡山市)は自由摂取とした．試験は，農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所動物実験実施に関する要領に基づいて実施した．

3.3.2.4. 窒素・エネルギー出納試験およびサンプリング項目

各期 14 日間の後半 5 日間を本試験期とし，開放型呼吸試験装置において糞尿分離機を用いた全糞尿採取を行った．本期 5 日間のうち 4 日間は，朝 10:00 から翌朝 9:30 まで呼吸試験も同時に行い，酸素消費量，二酸化炭素およびメタン発生量を 1 日の値に換算した．代謝試験の解析に必要となる給与飼料，残飼，糞，尿のサンプリングは，実験 1b と同様の方法で行った．

飲水量は，毎日 9:30 に飲水計により測定した．体重は，試験開始前および各試験期の 5,9,14 日目の 9:30 に測定し，各試験期の 9 日目と 14 日目を平均した値をその期の体重として示した．平均 DG は実験 1b と同様の方法で算出した．直腸温および呼吸数も実験 1b 同様に朝の飼料給与前に測定した．各試験期における最終日の朝の飼料給与前には，頸静脈からヘパリン入試験管に血液を，フィステルから第一胃内容液を採取し，実験 1b と同様の方法で分析するまで保存した．

粗飼料および液相の全消化管における通過速度および平均滞留時間は，実験 2b と同様の方法で実施した．

3.3.2.5. 分析項目

給与飼料，残飼および糞については，DM，CP，EE，灰分，NDFom およびエネルギー含量を測定し，尿については窒素 N およびエネルギー含量を実験 1b および 2b と同様の方法で測定した．非繊維性炭水化物(NFC)は有機物から NDFom，CP，EE を差し引いて求めた．

固相および液相の消化管における通過速度および平均滞留時間は，マーカー法(Hong ら 1988 ; 大下ら 1995)を用いて実験 2b と同様に測定した．また，経時的に採取した第一胃内

容液の pH も測定した.

血中の Hct 値は，ガラス製毛細管に血液を入れ一部をパテで封じ，ヘマトクリット遠心器(15000×*g*，5 分)で分離して測定した．総タンパク(TP)，アルブミン，血中尿素態窒素(BUN)，アスパラギン酸トランスフェラーゼ(AST)，アラニンアミノトランスフェラーゼ(ALT)，グルコース，総コレステロール，トリグリセライド，ケトン体，アルカリフォスファターゼ(ALP)，カルシウム(Ca)および遊離脂肪酸(NEFA) は血液自動分析計(7250 型; 日立ハイテク，東京)で測定した．トリヨードサイロニン(T_3)およびサイロキシン(T_4)は化学発光酵素免疫測定法により測定した(依頼分析，三菱メディエンス株式会社，東京).

各本試験期最終日の朝に採取した第一胃内容液は，遠心分離(1870×*g*,15 分,4℃)し，その上清を用いてアンモニア態窒素濃度をインドフェノール法(Weatherburnm 1967)により測定した.

育成雌牛のエネルギー出納を検討するにあたり，メタン(CH_4)の熱量，熱発生量(HP,KJ/日)，ならびにタンパク質としての体蓄積量(g/日)および脂肪としての体蓄積量(g/日)を実験 1b および 2b と同様の方法で算出した.

3.3.2.6. 統計処理

すべてのデータについて，SAS (2008)の GLM プロシジャにより温度処理の効果を分散分析で解析し，有意差の認められたデータを対象に処理間差の検定を Tukey の多重検定により行った.

3.3.3. 結果

高温環境が育成後期雌牛の生理応答および飼養成績に及ぼす影響を表 3-18 に示した．20℃時の体重と比較して，28℃および 33℃では体重が有意に高かった($P < 0.05$)．28℃時と 33℃時では差は認められなかった．DG は 33℃で低値であったが，個体差が大きく温度処理間に有意差は認められなかった．環境温度の上昇にともない体温および呼吸数は有意($P< 0.05$)に増加した．配合飼料の DM 摂取量には温度処理間で差を認めなかったが，粗飼料 DM 摂取量は 20℃および 28℃と比較して 33℃では有意に低かった($P < 0.05$)．DM,OM,CP および EE 消化率は 20℃および 28℃と比較して 33℃で有意に高く($P< 0.05$)，NFC 消化率は環境温度の上昇にともない有意に増加した($P< 0.05$)．しかし，NDFom 消化率には温度処理間で差を認めなかった.

Table 3-18 The effects of high environmental temperature on physiological status, feed intake, feed digestibility and daily gain of heifers

		Environmental temperature			SEM	Probability
		20°C	28°C	33°C		
Body weight	(kg)	431[b]	443[a]	444[a]	2	0.005
Average daily gain	(kg/day)	0.91	0.86	0.24	0.19	0.089
Rectal temperature	(°C)	38.7[c]	39.4[b]	40.3[a]	0.2	< 0.001
Respiration rate	(times/min)	39.3[c]	85.3[b]	107.3[a]	4.0	< 0.001
Water intake	(L/day)	32.0	30.5	49.6	7.3	0.202
Total DMI	(kg/day)	8.8[a]	7.9[b]	5.6[c]	0.2	< 0.001
Concentrate intake	(kg/day)	4.4	4.4	4.3	0.1	0.077
Italian ryegrass silage intake	(kg/day)	4.4[a]	3.5[a]	1.3[b]	0.2	< 0.001
DM digestibility	(%)	73.6[b]	76.1[b]	81.2[a]	0.6	< 0.001
OM digestibility	(%)	76.0[b]	78.2[b]	83.3[a]	0.6	< 0.001
CP digestibility	(%)	66.9[b]	69.4[b]	75.5[a]	0.8	0.001
NDFom digestibility	(%)	66.6	66.4	66.3	0.9	0.947
EE digestibility	(%)	70.4[b]	70.8[b]	80.8[a]	1.0	0.001
NFC digestibility	(%)	93.5[c]	95.1[b]	97.3[a]	0.4	< 0.001

SEM: standard error of the mean
Body weight: average of day 9 and day 14 of each experiment
DMI: dry matter intake
DM: dry matter
NDFom: neutral detergent fiber
NFC: non fibrous carbohydrate
[abc] Means in a row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

高温環境が育成後期雌牛における消化管内容物の通過速度に及ぼす影響を表 3-19 に示した．固相の CMRT2, CMRT および TMRT は，20℃および 28℃と比較して 33℃で有意($P<0.05$)に高かった．20℃と比較して 33℃では，固相の TD が高く，通過速度定数は低かった．液相の通過速度定数は 20℃および 28℃と比較して 33℃では有意に低く($P<0.05$)，液相の滞留時間は 33℃において有意に高かった($P<0.05$)．

Table 3-19 The effects of high environmental temperature on passage rate of feed in heifers

		Environmental temperature			SEM	Probability
		20°C	28°C	33°C		
Forage marked with Yb						
CMRT1	(h)	10.1	11.3	8.9	1.3	0.449
CMRT2	(h)	35.6^{b}	63.0^{b}	125.5^{a}	13.9	0.010
CMRT	(h)	45.7^{b}	74.3^{b}	134.3^{a}	13.2	0.008
TD	(h)	6.9^{b}	8.9^{ab}	12.8^{a}	1.0	0.013
TMRT	(h)	52.6^{b}	83.2^{b}	147.1^{a}	13.2	0.006
Rate constant of ruminal passage of feed	(%/h)	2.90^{a}	1.88^{ab}	0.91^{c}	0.26	0.005
Liquid marked with Co						
Retention time of liquid	(h)	9.4^{b}	14.3^{b}	22.5^{a}	1.2	< 0.001
Rate constant of ruminal passage of liquid	(%/h)	10.9^{a}	7.7^{a}	4.6^{b}	0.6	< 0.001

SEM: standard error of the mean
CMRT1: Mean retention time in the first compartment
CMRT2: Mean retention time in the second compartment
CMRT: Compartmental mean retention time (CMRT1+CMRT2)
TD: Time Delay
TMRT: Total digestion treat mean retention time (CMRT+TD)
^{abc} Means in a row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

高温環境が育成後期雌牛の血液性状に及ぼす影響を表 3-20 に示した．環境温度の上昇にともない，ALT 活性は有意に低下した($P < 0.05$)．20℃および 28℃と比較して 33℃では，コレステロールおよび T_3 濃度の低下，そしてトリグリセライド濃度の上昇が認められた($P < 0.05$)．20℃と比較して 33℃では，ヘマトクリット値および ALP 活性の減少が認められた($P < 0.05$)．

Table 3-20 The effects of high environmental temperature on blood composition of heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Hematocrit	(%)	31.1[a]	30.6[ab]	26.8[b]	0.9	0.030
Total protein	(mg/mL)	73.1	73.0	73.1	1.6	0.998
Albumin	(mg/mL)	39.5	39.2	37.8	0.7	0.278
Urea nitrogen (BUN)	(mg/dL)	14.2	14.8	14.4	0.7	0.800
Aspartate aminotransferase (AST)	(IU/L)	56.3	67.9	67.7	4.0	0.136
Alanine aminotransferase (ALT)	(IU/L)	20.3[a]	16.1[b]	11.2[c]	0.6	< 0.001
Glucose	(mg/dL)	82	77.7	71.8	2.8	0.104
Total cholesterol	(mg/dL)	110.9[a]	88.3[a]	60.3[b]	6.1	0.003
Triglyceride	(mg/dL)	14.7[b]	13.4[b]	18.9[a]	0.9	0.014
Total ketone bodies	(umol/L)	327	365	334	41	0.796
Alkaline Phosphatase (ALP)	(IU/L)	274[a]	175[ab]	101[b]	30	0.183
Ca	(mg/L)	9.78	9.21	9.14	0.18	0.082
Non-esterified fatty asid (NEFA)	(umol/L)	81.0	52.9	62.9	8.3	0.127
Triiodothyronine (T_3)	(ng/mL)	1.15[a]	1.17[a]	0.86[b]	0.04	0.005
Thyroxine (T_4)	(ng/mL)	69.0	74.0	77.5	3.5	0.291

SEM: standard error of the mean
[abc]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成後期雌牛の第一胃内容液性状に及ぼす影響を表 3-21 に示した．第一胃内容液のアンモニア態窒素濃度は，20, 28, 33℃の順に 11.7, 12.4, 17.8 mg/dL であり，20℃と比較して 33℃で有意に高かった($P < 0.05$)．また，酢酸割合は，20, 28, 33℃の順に 67.5, 66.8, 62.1 mol/100mol と 20℃と比較して 33℃において低下($P < 0.05$)し，酪酸割合は，11.8, 12.9, 16.3 mol/100mol と 20℃と比較して 33℃で増加した($P < 0.05$)．また，液相の通過速度を測定するために採取した第一胃内容液の 3 時間毎の pH は，0，3，6，9，12，15，18，21，24 時間目の順に，20℃では 7.0，6.6，6.5，6.4，6.3，6.4，6.5，6.8，6.9 であり，28℃では 6.5，6.1，6.3，5.9，6.0，6.3，6.3，6.5，6.6 であり，33℃では 6.3，6.0，6.1，5.8，5.8，6.1，6.2，6.4，6.5 であった．

Table 3-21 The effects of high environmental temperature on rumen fermentation parameters in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
pH		6.8	6.9	6.5	0.2	
NH3	(mg/dL)	11.7[b]	12.4[ab]	17.8[a]	1.3	0.031
Total VFA	(mmol/L)	101.9	100.2	82.4	7.8	0.226
Acetic acid	(mol%)	67.5[a]	66.8[a]	62.1[b]	1.1	0.021
Propionic acid	(mol%)	18.2	17.5	17.6	0.5	0.586
Butyric acid	(mol%)	11.8[b]	12.9[ab]	16.3[a]	0.9	0.035
Valeric acid	(mol%)	2.5[b]	2.9[b]	4.0[a]	0.2	0.009
Acetic : Propionic		3.7	3.8	3.6	0.1	0.319

SEM: standard error of the mean
[ab]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成後期雌牛のN出納に及ぼす影響を表3-22に示した．環境温度の増加にともない，1日あたりおよび代謝体重あたりで示したN摂取量および糞へのN排泄量は有意に低かった($P < 0.05$)．また，尿へのN排泄量は，20℃と比べ28℃および33℃において有意に低かった($P < 0.05$)．代謝体重あたりのN摂取量，糞へのN排泄量は環境温度の上昇にともない有意に低く($P < 0.05$)，その結果，N蓄積量は20℃および28℃と比較して33℃で有意に低かった($P < 0.05$)．N摂取量あたりの糞へのN排泄割合は，20℃および28℃と比較して33℃で有意に低く($P < 0.05$)，また，尿へのN排泄割合は28℃と比較して33℃で有意に高かった($P < 0.05$)．N摂取量あたりの蓄積N割合は温度処理間で有意差を認めなかった．

Table 3-22 The effects of high environmental temperature on nitrogen utilization in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Nitrogen intake	(g/day)	225.8[a]	197.0[b]	144.0[c]	5.2	< 0.001
Fecal nitrogen	(g/day)	74.6[a]	60.3[b]	35.3[c]	2.2	< 0.001
Urinary nitrogen	(g/day)	116.7[a]	98.8[b]	90.6[b]	3.1	0.003
Retained nitrogen	(g/day)	34.5[ab]	37.9[a]	18.2[b]	3.8	0.023
CP digestibility	(%)	66.9[b]	69.4[b]	75.5[a]	0.8	< 0.001
Nitrogen intake	(g/day/$BW^{0.75}$)	2.389[a]	2.043[b]	1.492[c]	0.047	< 0.001
Fecal nitrogen	(g/day/$BW^{0.75}$)	0.790[a]	0.626[b]	0.367[c]	0.018	< 0.001
Urinary nitrogen	(g/day/$BW^{0.75}$)	1.234[a]	1.022[b]	0.933[b]	0.034	0.002
Retained nitrogen	(g/day/$BW^{0.75}$)	0.365[a]	0.394[a]	0.192[b]	0.039	0.022
Fecal nitrogen	(% of intake)	33.1[a]	30.6[a]	24.5[b]	0.8	< 0.001
Urinary nitrogen	(% of intake)	51.7[ab]	50.3[b]	62.8[a]	2.6	0.027
Retained nitrogen	(% of intake)	15.3	19.1	12.7	2.0	0.153

SEM: standard error of the mean
[abc]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成後期雌牛のエネルギー出納に及ぼす影響を表 3-23 に示した．20℃および28℃と比較して 33℃では，1 日あたりの GE 摂取量，DE 摂取量および ME 摂取量が有意に低かった($P < 0.05$)．代謝体重あたりの GE 摂取量，糞への排泄エネルギー量および HP は，環境温度の上昇にともない有意に低かった($P < 0.05$)．代謝体重あたりのメタンとしての損失エネルギーおよび RE は，20℃および 28℃と比較して 33℃で有意に低かった($P < 0.05$)．GE 摂取量に対する糞への排泄エネルギー量および RE の割合は，20℃および 28℃と比較して 33℃で有意に低く($P < 0.05$)，GE 摂取量あたりの尿への排泄エネルギー量および HP の割合は 20℃および 28℃と比較して 33℃で有意に高かった($P < 0.05$)．GE 摂取量に対するメタンとしての損失エネルギー割合は，20℃と比較して 33℃で高い傾向にあった($P < 0.1$)．また，飼料エネルギーの消化率および代謝率は 33℃で有意に高かった($P < 0.05$)．

Table 3-23 The effects of high environmental temperature on energy utilization in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Gross energy intake (GEI)	(MJ/day)	162.9[a]	145.9[a]	103.3[b]	4.0	< 0.001
Digestible enegy intake (DEI)	(MJ/day)	119.6[a]	110.4[a]	82.6[b]	2.5	< 0.001
Metabolizable energy intake (MEI)	(MJ/day)	100.8[a]	93.2[a]	69.0[b]	2.2	< 0.001
Gross energy intake	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	1.724[a]	1.512[b]	1.070[c]	0.037	< 0.001
Fecal energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.458[a]	0.369[b]	0.214[c]	0.014	< 0.001
Urine energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.066[a]	0.057[b]	0.053[b]	0.002	0.012
Methane energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.133[a]	0.121[a]	0.089[b]	0.003	< 0.001
Heat production	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.779[a]	0.705[b]	0.593[c]	0.011	< 0.001
Retained energy	(MJ/day/kgBW$^{0.75}$)	0.288[a]	0.261[a]	0.122[b]	0.013	< 0.001
Fecal energy	(% of GEI)	26.6[a]	24.3[a]	19.9[b]	0.6	< 0.001
Urinary energy	(% of GEI)	3.8[b]	3.8[b]	5.0[a]	0.2	0.010
Methane energy	(% of GEI)	7.7	8.0	8.3	0.1	0.059
Heat production	(% of GEI)	45.2[b]	46.7[b]	55.4[a]	0.7	< 0.001
Retained energy	(% of GEI)	16.7[a]	17.2[a]	11.4[b]	0.6	0.001
Digestibility (DEI/GEI)	(%)	73.4[b]	75.7[b]	80.1[a]	0.6	< 0.001
Metabolizability (MEI/GEI)	(%)	61.9[b]	63.9[b]	66.8[a]	0.5	0.001

SEM: standard error of the mean
[abc]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

高温環境が育成後期雌牛の体蓄積の配分に及ぼす影響を表 3-24 に示した．20℃および28℃と比較して 33℃では，体脂肪としての蓄積エネルギー量は有意に低かった($P < 0.05$)．体タンパク質としての蓄積エネルギー量は，28℃と比較して 33℃で有意に低かった($P < 0.05$)．温度処理間で体重が異なったため，代謝体重あたりで換算すると，体タンパク質としての蓄積エネルギー量は 20℃および 28℃と比較して 33℃で有意に低かった($P < 0.05$)．体脂肪と体タンパク質の蓄積比は，温度処理間で差は認められなかった．

Table 3-24 The effects of high environmental temperature on energy distribution in heifers

		Environmental temperature				
		20°C	28°C	33°C	SEM	Probability
Retained energy	(MJ/day)	27.32[a]	25.22[a]	11.75[b]	1.40	< 0.001
as fat	(MJ/day)	22.18[a]	19.58[a]	9.05[b]	0.85	< 0.001
as protein	(MJ/day)	5.18[ab]	5.65[a]	2.73[b]	0.58	0.025
as fat	(MJ/day/MBS)	233.3[a]	202.0[a]	93.0[b]	7.7	< 0.001
as protein	(MJ/day/MBS)	54.5[a]	58.8[a]	28.8[b]	5.8	0.022
Retained body composition						
as fat	(g/day)	564.3[a]	498.3[a]	230.0[b]	21.8	< 0.001
as protein	(g/day)	215.8[ab]	236.8[a]	113.5[b]	23.9	0.023
fat : protein	(ratio of weight)	2.63	2.16	2.45	0.36	0.666

SEM: standard error of the mean
[ab]Different superscripts in the same row indicate significant differences ($P<0.05$).

3.3.4. 考察

3.3.4.1. 体温および呼吸数

体温および呼吸数は暑熱ストレスを測る上で有効な指標(Brown-Brandil ら 2006)の一つであるが，本実験の場合，28℃ではそれぞれ 39.4℃および 85 回/分と 20℃時と比較して呼吸数は倍増し，33℃ではそれぞれ 40.3℃および 107 回/分まで増加した．育成前期雌牛を用いて同じ環境条件で行った実験 1b においては, 28℃では体温 39.1℃, 呼吸数 56 回/分, 33℃では体温 40.1℃，呼吸数は 91 回/分であり，同じ環境温度で比較した場合，育成後期雌牛を用いた本実験の方が 28℃の呼吸数は 1.5 倍と高い値を示した．これらのことから，育成後期雌牛では育成前期雌牛と比較して，高温の影響が低い温度域から現れることが示され

た．体重が大きいほど体重に対する体表面積の割合が相対的に小さくなるため，熱放散の効率が低い(三村 1980)ことが指摘されているように，体重が重い育成後期雌牛は，体重の低い育成前期雌牛と比べ，体温や呼吸数が上昇したと考えられた．

また，育成前期雌牛を用いて，RH80%とした実験 2b においては，体温および呼吸数は 28℃では 40.2℃および 98 回/分，33℃では 41.1℃および 114 回/分であり，同じ環境温度では本実験の体温の方が低い値を示した．これら暑熱感作時の体温および呼吸数の変化から判断すると，環境温度 20℃における DG が 0.9kg 程度の育成後期雌牛に対する RH60%時の高温の影響は，28℃から現れ，その程度は RH60%下の育成前期雌牛よりは大きく，RH80%下の育成前期雌牛よりは小さいと考えられた．

3.3.4.2. 飲水量，採食量，飼料消化率および増体日量

本実験において，飲水量に有意な温度処理間差を認めなかったが，乾物摂取量(DMI)あたりの飲水量は 20℃，28℃，33℃で 3.6，3.9，8.6 L/日/DMI と，20℃および 28℃と比較して 33℃では増加する傾向にあった．暑熱時の飲水量は，DMI の低下にも影響されるが，DMI あたりの飲水量は多数の報告と同様，暑熱時に増加した(Kellaway と Colditz 1975 ; Kurihara ら 1989 ; Nardone ら 1997 ; Bernabucci ら 1999)．一方，本実験において，33℃の飲水量は，個体差が大きく有意ではないが，28℃の 1.6 倍を示した．育成前期雌牛を用いた実験 1b および 2b における 28℃と比べた 33℃の飲水量は，RH60%および RH80%では，それぞれ 1.3 倍および 0.9 倍を示した．高温時における家畜からの水分蒸発量，すなわち潜熱放散量は，周囲の湿度に影響され，RH が高い場合には抑制される(塩谷ら 1997)．また，乾乳牛において，水分蒸発量は飲水量が高いほど高いとの報告(栗原ら 1984)がある．これらのことから，33℃における飲水量は環境中の RH に影響され，水分蒸発による潜熱放散の増大が飲水量を増加させる大きな要因と考えられた．

粗飼料と配合飼料を分離給与した泌乳牛では，採食量の減少程度は乾草＞サイレージ＞配合飼料の順と報告されている(栗原ら 1992)．一方，本実験では，配合飼料の採食量に温度処理間差を認めず，粗飼料の採食量のみが 28℃および 33℃で 20℃のそれぞれ 80%および 30%量に減少した．また，同様の環境温湿度処理を行った実験 1b では 33℃で粗飼料摂取量のみが 20℃の約 80%量に減少し，RH80%とした育成前期雌牛では 28 および 33℃において粗飼料が 20℃のそれぞれ約 50%および約 20%量に低下し，配合飼料も 33℃で 20℃の 75%量に減少した．これらのことから，乳牛の採食量に及ぼす高温環境の影響は，配合飼料よりも粗飼料の方が大きく，その影響の程度は体が大きいほど暑熱の程度を顕著に反映するものと考えられた．

反すう家畜における飼料の消化率は，暑熱環境下において増加するという報告が多い．その理由として，暑熱下では高品質の飼料を給与するため(Shibata と Mukai 1979; 栗原ら 1992)，飼料の消化管内滞留時間が増加するため(Warren ら 1974; Schneider ら 1988)，配合飼料と比べて相対的に消化性の低い粗飼料の摂取量が低下するため(栗原ら 1992)などが考えられている．また，Tajima ら(2007)は本実験の第一胃内容液性状を詳細に検討し，33℃における門レベルの微生物叢が変化したことを示した．こうした微生物叢の変化が消化率に影響を及ぼした可能性も考えられる．

一方，RH を 60%または 80%とし，環境温度を 20，28，33 ℃とした育成前期雌牛を用いた実験 1b および 2b においても，NDFom 消化率は本実験と同様に温度処理間に有意差は認めず，DM および NFC の消化率は高温時に有意に増加した．また，RH80%とした実験 2b では，本実験と同様に OM，CP および EE の消化率が増加した．この時，育成前期雌牛を用いた実験 1b および 2b における 33℃と 20℃との粗飼料摂取量, 乾物消化率および飼料の消化管滞留時間の差は，RH60%および RH80%において，それぞれ－0.5kg および－2.3kg，＋3.6%ポイントおよび＋8.5%ポイント，＋35.9 時間および＋115 時間であり，本実験 3b では－3.1kg，＋7.6%ポイントおよび＋94.5 時間であった．これらのことから，同じ環境温湿度の場合，育成後期雌牛は育成前期雌牛より暑熱による負の影響を受けやすく，また，高温環境下における育成雌牛の DM など飼料消化率の増加は，粗飼料摂取量が減少した結果としての飼料の消化管滞留時間の増加と，飼料中の濃厚飼料量の増加に深く関係したと考えられた．さらに，育成前期雌牛の 33℃における第一胃内容液の pH は，RH60%および RH80%において，それぞれ 6.8 および 6.9 と 20℃時の 7.1 および 7.3 と比較して有意に低下しており, 本実験でも有意ではないが 6.5 まで低下した(Tajima ら 2007)．また，本実験 3b において，液相の通過速度を測定するために採取した第一胃内容液の 3 時間毎の pH を見ると，33℃では，朝の給餌後 9h および 12h（夕方の給餌後 3h および 6h）では 6.0 を下回っており，最も pH が高い値を示した朝の給餌前においては 6.4 であった．

主要なセルロース分解菌は低 pH に弱く，pH6 以下では発育速度は急激に低下し，溶菌するものもある(小野寺 2004)．本実験における第一胃内微生物叢を生菌で調べた Uyeno ら(2010)によると，繊維分解菌である Fibrobacter は 20℃よりも 33℃において有意に低下した．これらのことから，NDFom 消化率が環境温度の影響を受けなかったのは，飼料の消化管滞留時間が増加する一方，配合飼料採食割合の増加により第一胃内におけるデンプン分解が促進され, 給餌後の pH の低下が繊維分解菌増殖に負の影響を与えたことが関係すると考えられた．

暑熱環境下での育成雌牛の飼料摂取量と増体日量を調べた報告は少ないが，Colditz と

Kellaway (1972)は体重 140kg のホルスタイン種育成雌牛を用いた実験において，暑熱環境下(38℃RH40%)の飼料摂取量は適温環境下(17℃RH70%)と比較して 14%低下したが，その時の DG の低下は 50%とさらに大きかったと報告している．本実験においては，20℃と比較して 28℃では，DMI および DG の低下割合はそれぞれ 10%および 6%を示したのに対し，33℃では，DMI の低下割合は 36%であったが，DG は 74%と大きく，Colditz と Kellaway (1972)の報告と同じ傾向であった．一方，育成前期雌牛を用いた実験 1b においては，33℃でも DMI および DG の有意な低下は認めておらず，同じ環境温湿度であっても，育成前期雌牛より育成後期雌牛は高温の負の影響を大きく受けることが示された．

RH80%における育成前期雌牛に対する高温の影響(実験 2b)は，20℃と比較して 28℃では DMI は 25%低下，DG は 16%低下しており，33℃では DMI は 50%低下，DG は体重が減少したため負の値と計算されたことから，RH60%とした本実験の育成後期雌牛より負の影響は大きいと考えられた．また，高温時には DM などの消化率は高まることを示しており，これらのことから，RH80% の育成前期雌牛および RH60% の育成後期雌牛において，高温時における DG に対する飼料摂取量減少の影響は，28℃では飼料消化率の増加により一定程度抑えられるが，33℃ではその効果は限定的であり，DG の低下割合は飼料摂取量の低下割合より大きいことが明らかとなった．

3.3.4.3. 血液性状

本実験において，血漿中総コレステロール， T_3 濃度および ALT，ALP 活性は高温時に低下し，グルコース濃度は低下する傾向にあったが，血漿中トリグリセライド濃度は 20℃および 28 と比べ 33℃で有意に上昇した．また，BUN および NEFA 濃度に温度処理間で有意差は認められなかった．総コレステロールおよびグルコース濃度の低下は，乾物摂取量低下に起因する栄養摂取量の不足(De Renis と Scaramuzzi 2003 ; Abeni ら 2007)や，肝臓でのコレステロール合成の低下，末梢組織でのコレステロール利用増加 (Shaffer ら 1981; Abeni ら 2007)，あるいは呼吸活動を支えるエネルギー源(Shaffer ら 1981; Wheelock ら 2010)としての利用増加，また糖新生低下(Abeni ら 2007)に起因すると考えられており，高温環境下の育成前期雌牛の血液性状を調べた実験 1b および 2b においても同様の結果であった．

甲状腺ホルモンの役割の一つは体温調節であり，体温上昇が認められるような暑熱環境下では甲状腺ホルモン濃度が低下することはよく知られている(Alnaimy ら 1992 ; Abeni ら 2007)．また，暑熱環境下の育成雌牛における DG の低下は血中 T_3 濃度の低下と比例する(Baccari ら 1983)，送風により暑熱ストレスを軽減したヒツジでは，DG の増加と T_3 濃

度の上昇が認められる(Koluman と Daskiran 2011)など，甲状腺ホルモン濃度は高温環境下での栄養状態の指標になり得る(Todini ら 2007)とも報告されている．そこで，育成雌牛を用いた実験 1b，2b および 3b で得られた体温および血漿中 T_3 濃度の値を各実験の温度処理毎に平均し，体温と血漿中 T_3 濃度の関係をみると，有意な負の相関関係が認められ(図 3-1)，既往の報告と一致した．また，DG と血漿中 T_3 濃度との関係では，既報と同様に DG の低い 33℃において血漿中 T_3 濃度も低い値を示した．

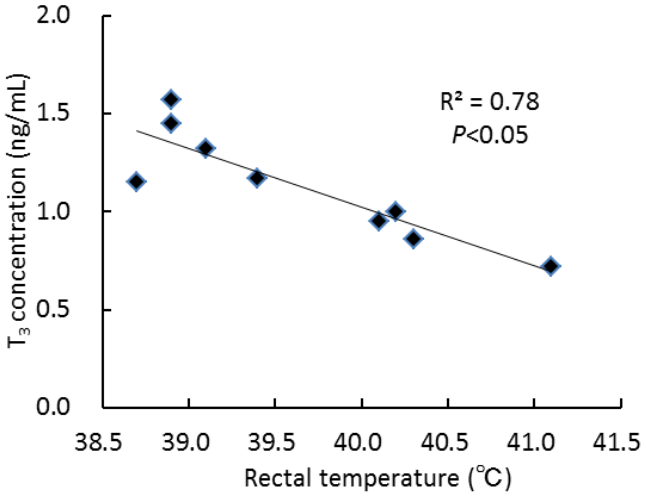

Figure 3-1　Relationship between rectal temperature and T_3 concentration of heifers.

本実験において ALP 活性は環境温度の上昇にともない低下し，実験 1b および 2b においても同様の結果であった．暑熱下の反すう家畜における ALP 活性を調べた報告はほとんどないが，Abeni ら(2007)は，夏季における泌乳牛の ALP 活性を測定し，暑熱下での ALP 活性の低下は，暑熱環境およびエネルギー代謝における変化，つまり，肝臓や腸の活動低下に対する内分泌順応反応との関連を示唆している．ALP は肝臓や胆道系，骨芽細胞などに含まれるエネルギー代謝に関わる酵素の一つであり，甲状腺機能低下症のヒトでは ALP 活性は低下することも知られている(Fraser 1957; Nanji 1982)．そこで，実験 1b，2b および 3b で得られた血漿中 T_3 濃度および ALP 活性の値を各実験の温度処理毎に平均し，T_3 濃度と ALP 活性の関係をみると，高い相関関係が認められた(図 3-2)．このことから，ALP 活性は T_3 濃度の指標となり，高温環境下における ALP 活性の低下は，T_3 濃度の低下により引き起こされている可能性も考えられる．しかし，ウシにおける両者の関係については不明な点も多く，更なる検討が必要である．

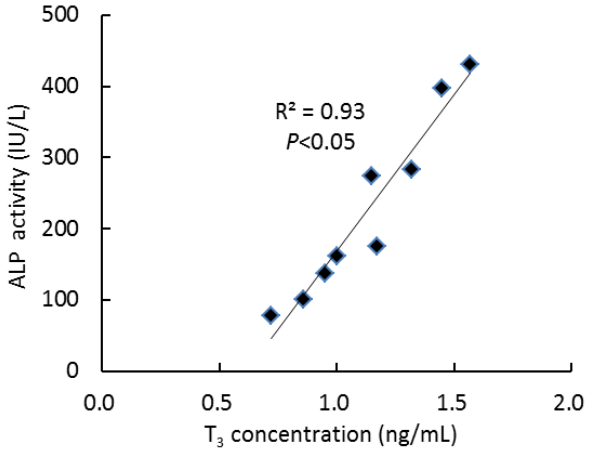

Figure 3-2 Relationship between T_3 concentration and ALP activity of heifers.

本実験では BUN 濃度が温度処理により変化せず, 育成前期雌牛を用いて同じ環境条件で行った実験 1b の結果とは一致しなかった．暑熱環境下における反すう家畜の BUN 濃度については，N 摂取量の低下を反映して低下するとの報告(Shaffer ら 1981(泌乳牛); Marai ら 1995(育成雌牛); Abeni ら 2007(泌乳牛))や，N 摂取量が同程度，あるいは低下しても増加するとの報告(White ら 1992(泌乳牛); 寺田ら 1999(泌乳牛); Obitsu ら 2011)があり，一定の結果が得られていない．本実験では適温時(20℃)において，給与飼料の粗濃比を 1：1 とし，日本飼養標準(乳牛)2006 年版(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)に基づいたエネルギー要求量を満たすように給与量を設定したが，イタリアンライグラスサイレージの CP 含量が 15.5%と高かったために，CP 摂取量が要求量の 1.5 倍になった．このため，20℃時の BUN 濃度が，ほぼ要求量通りの CP を摂取した育成前期雌牛の結果である 6.7 mg/dL 実験 1b と比較して，本実験では 14.1mg/dL と高い値を示した．また，本実験 3b では，環境温度の上昇ともに N 摂取量(CP 摂取量)は 28℃および 33℃では 20℃のそれぞれ 87%および 64%と有意に減少し，33℃における N 摂取量(144.0g/日)は実験 1b の 33℃の育成前期雌牛の N 摂取量(125.6g/日)とほぼ同じレベルとなり, BUN 濃度も同水準(14.4 vs 11.3 mg/dL)であった．これらのことから，本実験 3b において環境温度上昇により BUN 濃度が変化しなかったのは, 20℃において既に BUN 濃度が高値であったこと, ならびに高温時には 20℃時より N 摂取量が減少したために，BUN 濃度は増加しなかったと考えられた.

本実験 3b では NEFA 濃度は温度処理により変化せず，実験 1b および 2b においても同様の結果であった．高温による NEFA の上昇がみられなかった理由の一つとして，33℃で

あっても負のエネルギーバランスではなく増体し, 体脂肪は動員されなかったため(表 3-20, 表 3-23，表 3-24)と考えられた．さらに，暑熱下では，肝臓および末梢組織で NEFA の利用が増加する(Abeni ら 2007), 脂肪酸のβ-酸化は炭水化物の異化に比べて熱産生が小さく，暑熱下では NEFA が優先して利用されている(Wheelock ら 2010)など，NEFA の生産より利用の方が大きいことも考えられた.

本実験 3b で得られた血液性状値と実験 1b および 2b で得られた値を比較するために, 各実験の 20℃時の値を 100 とした場合の 28℃および 33℃での割合を比較し，高温負荷の程度を検討した．その結果，RH60%では 育成前期雌牛と育成後期雌牛の間に 20℃時に対する増加あるいは減少割合に差は認められなかったが，RH80%下の育成前期雌牛と比較すると，本実験の T_3，グルコース濃度および ALP 活性の方が，高温の影響による減少割合は少なかった．これらのことから，育成雌牛の血液性状に及ぼす高温の影響は，RH60%では育成時期による差はなく，また環境温度が同じ場合には，育成時期にかかわらず湿度の影響を受け，RH60%より RH80%の方が負の影響が大きいと考えられた．特に，T_3 濃度の減少割合は 28℃から差が認められており，このことからも暑熱の影響を血液性状で判断する場合の有効な指標の 1 つであると考えられた.

3.3.4.4. 窒素およびエネルギー配分

暑熱環境下の乳牛や肥育牛では尿中への N 排泄割合が高まると報告(White ら 1992; 寺田ら 1999 ; Obitsu ら 2011)されており，育成前期雌牛を用いた実験 1b および 2b においても同様の結果であった．しかし，本実験では，尿への N 排泄量は，1 日あたり，もしくは代謝体重あたりでは高温時に有意に減少し，摂取量あたりの尿への N 排泄割合は 33℃でのみ増加が認められた．また，第一胃内容液中のアンモニア態窒素濃度は 33℃で有意に増加したが，BUN 濃度は温度処理間で差はなく，既報の結果と一致しなかった.

尿への窒素排泄量および排泄割合が育成前期雌牛を用いた実験 1b のように増加しなかったのは，BUN 濃度が増加しなかった理由と同じく，摂取飼料中のタンパク質量が要求量を大きく上回っていたためと考えられる．育成前期雌牛を用いた実験 1b および 2b における摂取量あたりの尿への排泄割合 26%および 30%であり，これらと比較して本実験においては 20℃時で 52%と非常に高い数値であった. すなわち本実験の 20℃時では，育成ステージが進み，体格も成牛に近づき，成長に要する N 量の増加も鈍化した上に，摂取量自体も過剰だったため, 尿中へのN排泄量およびN排泄割合が大きくなったと考えられた. また28℃では，本実験においてN摂取量は有意に減少したが，摂取量に対する尿への N 排泄割合は約 50%と 20℃時と同様であり，実験 1b の 42%および実験 2b の 56%とも大きな差を認め

なかった．さらに 33℃では，本実験および育成前期雌牛を用いた実験 1b および 2b において，尿中への N 排泄割合が増加した．本実験では 28℃，33℃と窒素摂取量の減少にともない，尿中 N 排泄量は減少したが，高温時には体タンパク質分解量が増加し尿中 N 排泄量の増加要因となる（柴田ら 1989 ; 寺田ら 1999）と考えられていることから，その結果として本実験の N 排泄割合は 28℃においては既報とほぼ同じ値を示し，33℃では既報と同様に有意に増加したと考えられた．

本実験において窒素およびエネルギー出納から脂肪とタンパク質への体組織蓄積配分を試算したところ, 代謝体重あたりの脂肪としての蓄積エネルギー量は, 20℃と比較して 28℃で差はなく，33℃で低下した．タンパク質としての蓄積エネルギー量も同様に 33℃で低下した．育成前期雌牛を用いた実験 1b では，高温下では脂肪としての蓄積エネルギー量は変わらないが，タンパク質としての蓄積エネルギー量は低下する結果を得た．しかし，育成後期雌牛を用いた本実験ではタンパク質と脂肪の蓄積割合は，温度処理間で差は認められなかった．育成雌牛は月齢によって増体における脂肪とタンパク質の配分が異なること(ARC 1981)が示唆されており，体タンパク質としての蓄積が主である育成前期雌牛と体脂肪蓄積が増加する育成後期雌牛では，体タンパク質と体脂肪の蓄積配分に及ぼす高温の影響も異なることが明らかになった．

以上の結果より，育成後期雌牛(体重約 400kg)に対する高温の影響は，28℃から呼吸数の増加，体温上昇，摂取量の減少，血液性状の変化として現れ，33℃ではこれらの生理機能および栄養消化に及ぼす影響がさらに大きく現れた．また，同じ高温環境では，育成前期雌牛と比較して育成後期雌牛の方が，体温および呼吸数などの生理応答や飼料摂取量の低下割合から，より大きい負の影響を受けることが明らかになった．

3.3.5. 小括

ホルスタイン種育成後期雌牛 4 頭を用い，環境温度 20,28 および 33℃を各 2 週間ずつ順次負荷し，高温が育成後期雌牛の生理応答，窒素およびエネルギー出納に及ぼす影響を調べた．その結果，環境温度の上昇にともない，呼吸数および体温は増加し，粗飼料の摂取量は減少した． 窒素出納は 28℃から影響を受け，窒素摂取量あたりの糞への窒素排泄割合は 33℃で低下したが，尿への窒素排泄割合は高かった．エネルギー出納は 28℃から影響を受け，蓄積エネルギー量は 33℃で低下したが，脂肪およびタンパク質への体蓄積割合は変化しなかった．以上の結果から，育成後期雌牛では 28℃から高温による負の影響を受けると考えられた．

4 章. ホルスタイン種育成雌牛の高温環境下における代謝エネルギー要求量，利用効率および体蓄積配分（実験 1b, 2b, 3b, 4, 5, 6, 7）

4.1. 目的

わが国におけるウシの維持や生産に要する代謝エネルギーについては，ホルスタイン種成雌牛(橋爪ら 1963a，1963b; Shibata と Mukai 1979; 柴田ら 1982; 柴田 1983; 栗原ら 1990, 1991, 1992, 1995; 樋口ら 2015)，および，黒毛和種牛(橋爪ら 1966, 1967a，1967b; 岩崎 1986)で，数多くのデータが蓄積されてきた．さらに，離乳前後のホルスタイン種雄牛の維持や成長に要する代謝エネルギー量については，関根ら(1985, 1986)と Sekine ら(1987)が検討している．酪農経営に占める育成期の飼料コストは 15～20%と試算されており(Heinrichs 1993)，育成期の経済性を考慮する場合，育成雌牛の維持および成長に要するエネルギー量の正確な推定が極めて重要である(NRC 2001)．しかし，成長過程にあるホルスタイン種育成雌牛の維持や成長に要する代謝エネルギー量について検討した研究成果はわが国では非常に少ない．

本研究 2 章および 3 章では，育成雌牛に及ぼす暑熱環境の影響を検討し，育成のステージや高湿度環境によっては摂取量や増体量の低下を招き，温暖化の進行にともない全国各地で育成期の生産低下が予測されることを示唆した．これらのことを踏まえ，適温環境下のみならず，高温環境下における育成雌牛の維持エネルギー要求量や成長に対するエネルギーの利用効率について検討することは，育成雌牛を効率的に飼養する上で今後非常に重要である．

そこで，本研究では，ホルスタイン種育成雌牛のエネルギー出納試験結果から，適温環境下あるいは高温環境下における維持に要する代謝エネルギー量(以下，ME_m)および成長に対する代謝エネルギーの利用効率(以下，k_g)について検討した．

4.2. 試験方法

適温環境下または高温環境下におけるホルスタイン種育成雌牛の維持および成長に要するエネルギー量を回帰分析により求めるにあたり，本研究の実験 1b～3b に加え，下記 4 つの実験結果を用いた．

実験 4

バイパスタンパク質飼料が暑熱環境下育成雌牛における窒素およびエネルギー代謝に及ぼす効果をみるために，ホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭(平均月齢 7.5±0.2 ヵ月，平

均体重 190±30 kg) を用い，環境温度 30℃(RH は 60%一定)において，バイパスタンパク質飼料添加により CP 充足率 100%，110%，120%とした飼料(対照区：飼料 CP13.3%，CP110%充足区：CP14.0%，CP120%充足区：CP15.0%)を，1 期 14 日間の 3×3 ラテン方格法により給与した．各期の最初の 9 日を予備期，残りの 5 日を本期として全糞尿採取による消化試験および呼吸試験を行った．窒素およびエネルギーの分析および解析については実験 1b～3b と同様に行った．

実験 5

品質の異なる粗飼料が暑熱環境下育成雌牛における採食量に及ぼす影響をみるために，ホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭(平均月齢 8.4±0.3 ヵ月，平均体重 217±5 kg) を供試し，環境温度 30℃(RH は 60%一定)において，配合飼料一定量給与のもと，品質の異なる 3 種のイタリアンライグラスサイレージ(良質：飼料 CP 21%，NDF59%，標準：CP14%，NDF64%，低質：CP12%，NDF66%) を 1 期 21 日間の 3×3 ラテン方格法により自由採食させた．各期の最初の 16 日を予備期，残りの 5 日を本期として全糞尿採取による消化試験および呼吸試験を行った．窒素およびエネルギーの分析および解析については実験 1b～3b と同様に行った．

実験 6

飼料 CP 含量または飼料給与水準が育成雌牛の体脂肪および体タンパク質蓄積に及ぼす影響をみるために，ホルスタイン種育成後期前期雌牛 8 頭(平均月齢 18.2±0.7 ヵ月，平均体重 383±19 kg) を供試し，環境温度 18℃(RH は 60%一定)において，異なる飼料 CP 含量(CP11.8%と 14.7%)の飼料に 4 頭ずつ割り当て，ME_m の 2 倍量，ME_m 量，ME_m の 1.5 倍量を順に給与する 1 期 14 日間の実験を実施した．各期の最初の 9 日を予備期，残りの 5 日を本期として全糞尿採取による消化試験および呼吸試験を行った．窒素およびエネルギーの分析および解析については実験 1b～3b と同様に行った．

実験 7

飼料 CP 含量または給与水準が育成雌牛の体脂肪および体タンパク質蓄積に及ぼす影響をみるために，ホルスタイン種育成前期雌牛 6 頭(平均月齢 9.4±0.2 ヵ月，平均体重 272±6 kg) を供試し，環境温度 20℃(RH は 60%一定)において，異なる飼料 CP 含量(CP15.6%と 12.5%，TDN はともに 64%)の飼料に 3 頭ずつ割り当て，1 期 14 日間のクロスオーバー法で実験を行った．その際，1 期目に ME_m の 2 倍量，2 期目に ME_m の 1.5 倍量を給与した．各期の最初の 9 日を予備期，残りの 5 日を本期として全糞尿採取による消化試験お

よび呼吸試験を行った．窒素およびエネルギーの分析および解析については実験 1b～3b と同様に行った．

表 4-1 には，それぞれの実験の概要を示した．環境温度は 18，20，28，30，33℃であり，18℃と 20℃を適温環境，28，30，33℃を高温環境とみなした．試験 1b, 2b, 4, 5, 7 の供試牛を育成前期雌牛，試験 3b，6 を育成後期雌牛と定義した．

Table 4-1 Summary of animal experiments for energy and nitrogen metabolism

	Number of heifers (No.)	Total of results (No.)	Average of age (month±SE)	Average of body (kg±SE)	Environmental temperature (℃)	Environmental relative (%)	Crude protein in diet (%)	MEI/GEI (%)
Experiment 4	4	12	8.9 ± 0.2	237 ± 6	20, 28, 33	60	14.8	60[†] (59-61)[‡]
Experiment 5	4	12	11.2 ± 0.5	277 ± 9	20, 28, 33	80	14.8	60 (59-61)
Experiment 6	4	12	17.5 ± 0.5	439 ±15	20, 28, 33	60	15.8	64 (62-67)
Experiment 7	4	12	7.5 ± 0.2	190 ±11	30	60	13.3, 14.0, 15.0	58 (57-58)
Experiment 8	4	12	8.4 ± 0.3	217 ± 5	30	60	14.9, 16.1, 19.8	55 (52-59)
Experiment 9	8	20	18.2 ± 0.7	383 ±19	20	60	11.8 or 14.7	58
Experiment 10	6	12	9.4 ± 0.2	272 ± 6	18	60	12.5 or 15.6	53

[†] the average of data

[‡] the minimum to maxmum of data

MEI : Metabolizable energy intake

GEI : Gross energy intake

Table 4-2 Age, body weight, dry matter intake, metabolizability of energy in diet and retained energy of each stage heifers under themoneutral or hot environment

		Thermoneutral environment				Hot environment	
		Early growth stage		Late growth stage		Early growth stage	
n		16		21		37	
Environmental temperature	℃	20†	(18 ～ 23)‡	20	(18 ～ 23)	30	(28 ～ 33)
Age	month	9.8	(7.9 ～ 11.7)	18.4	(15.7 ～ 20.4)	8.6	(6.5 ～ 12.1)
Body weight	kg	265	(219 ～ 302)	386	(343 ～ 465)	225	(166 ～ 298)
Dry matter intake	kgDM/day	5.8	(4.0 ～ 6.6)	7.6	(4.8 ～ 9.3)	4.8	(3.8 ～ 5.7)
Metabolizability of energy in diet	ME/GE	0.56	(0.51 ～ 0.60)	0.58	(0.55 ～ 0.62)	0.58	(0.48 ～ 0.64)
Crude protein content in diet	%	14.7	(12.7 ～ 17.2)	14.0	(11.9 ～ 16.0)	15.9	(13.5 ～ 20.1)
Retained energy	$kJ/BW^{0.75}$	167	(26 ～ 282)	215	(27 ～ 378)	182	(30 ～ 328)
as protein	$kJ/BW^{0.75}$	79	(5 ～ 115)	65	(23 ～ 114)	80	(23 ～ 142)
as fat	$kJ/BW^{0.75}$	88	(10 ～ 167)	150	(4 ～ 264)	102	(2 ～ 224)
Retained protein to retained energy	%	49	(17 ～ 79)	36	(16 ～ 86)	48	(21 ～ 94)

† the average of data

‡ the minimum to maxmum of data

これらの実験結果の中から，k_gをより正確に求めるために，エネルギー蓄積がマイナスとなったデータ(10 頭のべ 10 例)を除いて解析した．また，高温環境下育成後期雌牛のデータ数(4 頭のべ 8 例)は正確な解析に必要な数を満たしていないと考え，解析対象から除外した．その結果，適温環境下育成前期雌牛(7.9～11.7 ヵ月齢，n＝16，以下，適温下前期牛)，適温環境下育成後期雌牛(15.7～20.4 ヵ月齢，n=21，適温下後期牛)，高温環境下育成前期雌牛(6.5～12.1 ヵ月齢，n=37，高温下前期牛)の 3 区分を対象として比較解析することとした．解析に用いたデータの概要を表 4-2 に示した．

ホルスタイン種育成雌牛の ME_m と k_gを求めるにあたり，ME 摂取量(MEI)は維持と成長に消費されると仮定し，エネルギー出納試験において得られたデータを以下の式にデータをあてはめて解析した．なお，各試験区における給与飼料の効果については，それぞれの報告において乳用種育成雌牛向けの一定の範囲内のエネルギー，タンパク質濃度の飼料を供試していることから，これを変量模型として取り扱うこととした．(JMP® 11).

$$RE_{ij} = D_i + a \times (MEI_{ij} - ME_m) + e_{ij} \quad \text{----------} \quad \text{式 1}$$

RE_{ij}：蓄積エネルギー量

D_i：給与飼料 $_i$ の効果(変量模型)

MEI_{ij}：代謝エネルギー摂取量

ME_m：維持に要する代謝エネルギー量(x 切片)

a：成長に対する代謝エネルギーの利用効率(すなわち，k_g)

e_{ij}：誤差

解析により得られた ME_m 値について，環境温度間あるいは育成ステージ間での有意差検定は，誤差伝搬の法則により求めた標準誤差の値から判断した(吉沢 1989)．さらに，傾きである k_g については，式 1 により求めた各区の ME_m を MEI から差し引いた値を用いて原点を通る回帰直線として共分散分析法により検定を行った．

また，蓄積エネルギーが体タンパク質または体脂肪へ配分される割合を求めるために，エネルギーおよび窒素出納結果を以下の式をあてはめ，体タンパク質および体脂肪としての蓄積エネルギー量をそれぞれ推定した．

$RE_p(kJ/BW^{0.75})$ = 窒素蓄積量(g)×6.25×23.6 (ARC,1980)---------式 2

$RE_f(kJ/BW^{0.75})$ = 蓄積エネルギー量$(kJ/BW^{0.75})$－$RE_p(kJ/BW^{0.75})$ -----式 3

RE_p：体タンパク質としての蓄積エネルギー量

RE_f：体脂肪としての蓄積エネルギー量

RE，RE_p および RE_f の 3 区間における違いについては，下記の混合モデルを用いて解析し，区間差については Tukey の方法により検定した．

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + Dij + MEI_{ijk} + e_{ijk} \quad \text{---------- 式 4}$$

X_{ijk}：RE，RE_p または RE_f

μ ：全体の平均

α_i：試験区 $_i$ の効果

D_{ij}：給与飼料 $_{ij}$ の影響（変量模型）

e_{ij}：誤差

さらに，代謝エネルギー要求量は維持エネルギー(ME_m)，体タンパク質蓄積エネルギーおよび体脂肪蓄積エネルギーからなると仮定し，蓄積エネルギーの配分を斉藤と安藤(1986)および Kielanowski（1965）の式を一部修正した下記の重回帰式から求め，体タンパク質蓄積および体脂肪蓄積への代謝エネルギーの利用効率を求めた．

$$MEI_{ij} - ME_m = D_i + cRE_{pij} + dRE_{fij} + e_{ij} \quad \text{---------- 式 5}$$

MEI_{ij}：代謝エネルギー摂取量

ME_m：維持に要する代謝エネルギー量

D_i：給与飼料 $_i$ の効果（変量模型）

RE_{pij}：体タンパク質としての蓄積エネルギー量

RE_{fij}：体脂肪としての蓄積エネルギー量

c：1kJ 相当のタンパク質を蓄積するために要する ME 量

d：1kJ 相当の体脂肪を蓄積するために要する ME 量 e_{ij}：誤差

体タンパク質および体脂肪蓄積に対する ME の利用効率は，それぞれ 1/c×100 および 1/d×100 によって算出した．なお，ME_m には式 1 による解析結果を用いた．

4.3. 結果

育成雌牛の維持に要する代謝エネルギー量および成長に対する代謝エネルギー量の利用効率を比較するために，MEI および RE を式 1 にあてはめ検討し，また，その関係を図 4-1 に示した．その結果，適温下前期牛は，RE＝0.456×MEI－245 (R^2＝0.927)となり，ME_m は 538±158kJ/$BW^{0.75}$，k_g は 46±7%であった．そして，適温下後期牛は，RE＝0.522×MEI －263 (R^2＝0.965)となり，ME_m は 505±77kJ/$BW^{0.75}$，k_g は 52±4%であった．一方，高温下前期牛は，RE＝0.564×MEI－298 (R^2＝0.806)となり，ME_m は 529±50kJ/$BW^{0.75}$，k_g は 56±3%であった．誤差伝搬の法則により求めた標準誤差の値を比較したところ，これら 3 区の ME_m 値に差はないと判断できた．3 区の ME_m の平均は 524kJ/$BW^{0.75}$ であった．しかし，k_g については，適温下前期牛の 46%と適温下後期牛の 52%は異なる傾向があり(P< 0.1)，高温下前期牛の 56%は，適温下前期牛(P< 0.001)，適温下後期牛(P< 0.05)と比較して高い値であった．

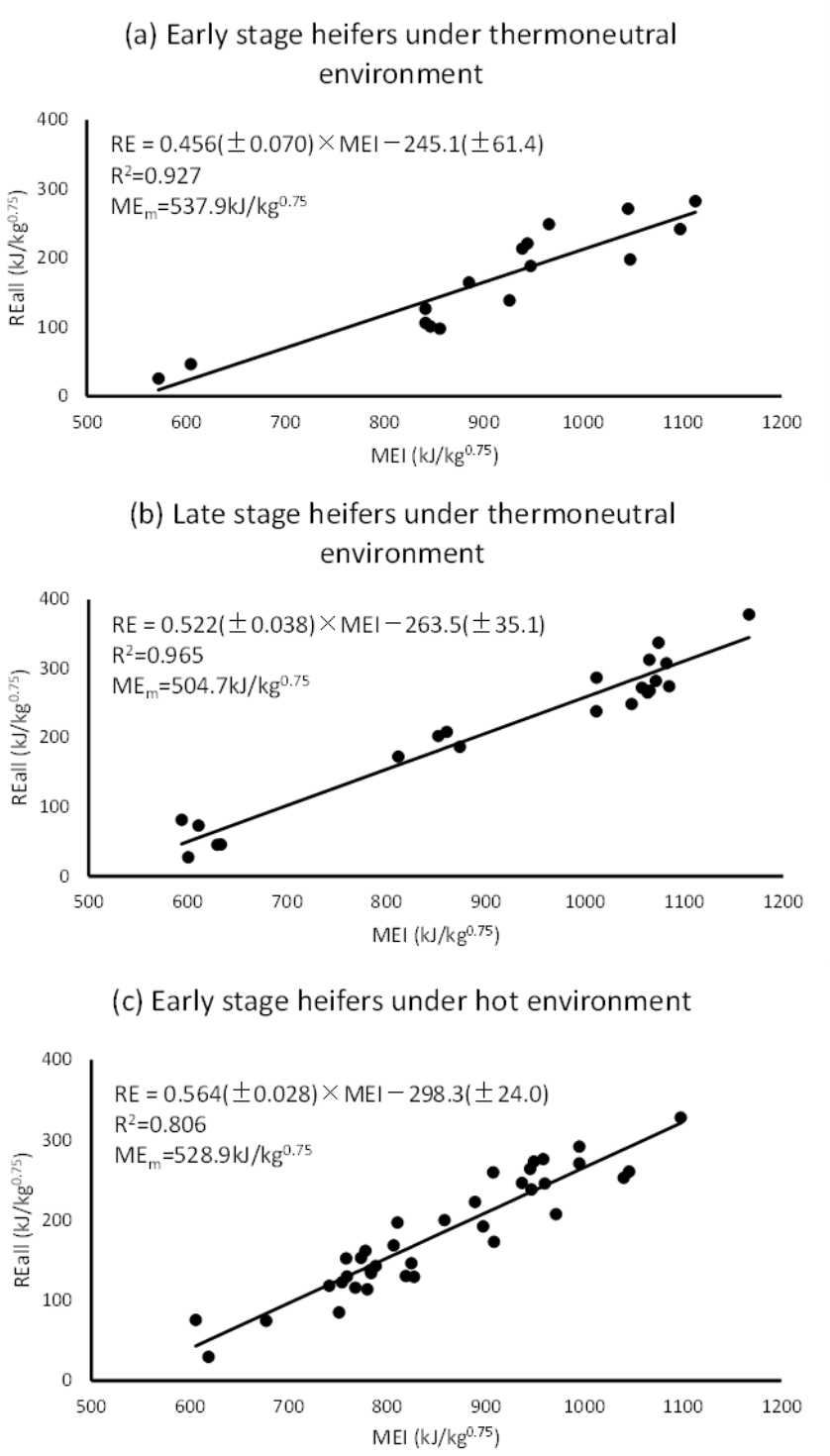

Figure 4-1 Relationship between metabolizable energy intake and retention energy of heifers.

(a) Early stage heifers under thermoneutral environment.
(b) Late stage heifers under thermoneutral environment.
(c) Early stage heifers under hot environment.

●: retention energy, ——: range of predicted value

体タンパク質および体脂肪として蓄積する代謝エネルギー量(RE_pおよびRE_f)を式2および式3から推定し，それらを式4の混合モデルにおいて，MEIを補助変数として共分散分析を行った．その結果，適温下前期牛と比較して，適温下後期牛および高温下前期牛のエネルギー蓄積総量(RE)および体脂肪蓄積量は多かった(表4-3).

Table 4-3 Retainede energy, retained energy as fat and retained energy as protein of each stage heifers under themonutral or hot environment

	Thermonutral environment		Hot environment	Probabilit
	Early growth stage	Late growth stage	Early growth	
	LSM ±SE	LSM ±SE	LSM ±SE	
RE	155.7[b] ±7.7	196.6[a] ±6.8	197.2[a] ±5.3	0.002
RE_p	73.5[ab] ±6.5	61.8[b] ±5.8	83.6[a] ±4.8	0.033
RE_f	79.7[b] ±8.5	136.2[a] ±7.4	113.2[a] ±5.7	0.004

[ab] Least square means in a row with different superscripts differ significantly (P<0.05).

さらに，ME_mを3区の平均値である524kJ/$BW^{0.75}$と仮定し，全データを用いて，タンパク質あるいは脂肪としてのエネルギー蓄積に対するME利用効率を式5により求めたところ，次の結果を得た.

$$MEI - ME_m = 2.77(\pm 0.18) \times RE_p + 1.21(\pm 0.10) \times RE_f \quad (R^2=0.963)$$

これらより，体タンパク質への利用効率は36%，体脂肪への利用効率は83%と推定し得た．また，これらの数値により試算した蓄積量と実測値(すなわちMEI－ME_mの残さ)を比較したところ，高温下前期牛では過大評価(－15.4 kJ/$BW^{0.75}$)，適温下前期牛(＋46.7 kJ/$BW^{0.75}$)および適温下後期牛（＋23.4 kJ/$BW^{0.75}$)では過小評価となり，区によって偏る傾向が認められた．しかし，MEI－ME_mに占める残さの割合は8%であり，それほど大きくないと判断し得た.

4.4. 考察

適温下における6ヵ月齢までのホルスタイン種去勢雄子牛のME_mについては関根ら(1985, 1986)およびSekineら(1987)が報告している．それらによると，ME_mは平均月齢4ヵ月・平均体重80kgの去勢雄子牛と6ヵ月齢・110kgの去勢雄子牛で差はなく，平均すると522kJ/$BW^{0.75}$(関根ら1985)，5ヵ月齢・100kgの去勢雄子牛では528 kJ/$BW^{0.75}$(関根ら1986)，平均体重170kgの去勢雄子牛では，513kJ/$BW^{0.75}$(Sekineら1987)であり，本解析での育成前期牛の適温538±158kJ/$BW^{0.75}$，および高温529±50kJ/$BW^{0.75}$と同程度であっ

た．本解析における育成後期の結果を入れた全頭の平均 ME_m である 524kJ/$BW^{0.75}$ は，日本飼養標準・乳牛 2006 年版(農業・食品産業技術総合研究機構 2007)の ME_m487kJ/$BW^{0.75}$ と比較し約 1 割大きかった．日本飼養標準・乳牛(2007)では，乾乳牛による測定データに基づき ME_m を設定している．基礎代謝の要求量は内臓の大きさや代謝活性に大きく影響を受ける(NRC 1996)ことから，本解析結果と日本飼養標準の ME_m の差異はこのような違いから生じたものと考えられる．

一方，異なる環境温度の ME_m を求めた実験として，栗原ら（1990, 1991）は，維持量給与時のホルスタイン種乾乳牛において，18℃RH60%と比較して 26℃RH60%および 32℃RH60%では，呼吸数の増大などにより熱放散機能が亢進し，体温の恒常性維持のために維持エネルギー量が約 6～15%増加すると報告した．これは，育成前期において異なる環境温度下における ME_m(適温 538kJ/$BW^{0.75}$, 高温 529kJ/$BW^{0.75}$)に差が認められなかった本解析結果とは異なった．その理由として，栗原ら(1991)も述べているが，高温時における ME_m の増加程度は給与飼料の質に影響されることが考えられる．栗原ら(1990, 1991)が供試した給与飼料の代謝率(ME/GE，以下 q)は 40～46%であったが，本解析で用いた摂取飼料の q は 48～64%(平均 58%)と非常に高く，そのため，高温下においても ME_m の増加が認められなかったと考えられた．すなわち，DG0.8～0.9kg/日を目標とした ME 価の高い良質飼料を給与した場合は，高温環境下でも育成雌牛の ME_m は増加しないと考えられた．

本章における成長に対する ME の利用効率である k_g は，高温下前期牛では 56%であり，適温下前期牛の 46%より高かった．これは，体タンパク質あるいは体脂肪としてのエネルギーの蓄積量が，環境温度によって異なることが関連している可能性がある．そこで，体タンパク質および体脂肪として蓄積する代謝エネルギー量(RE_p および RE_f)を式 4 の混合モデルにあてはめ，共分散分析を行った．その結果，高温下前期牛のエネルギー蓄積総量(RE)は，適温下前期牛に比べて多かったが，それは体タンパク質ではなく体脂肪として蓄積されたことによるものであった．すなわち，高温下では体脂肪蓄積量が増加するため，ME の成長に対する利用効率である k_g が高まることが示唆された．

本解析の結果，適温下の ME の成長に対する利用効率 k_g は，適温下前期牛 46%，適温下後期牛 52%であり，育成前期に比べ育成後期で高かった．NRC(2001)では，育成雌牛は成熟するにつれ，空体重中のタンパク質割合は減少し，脂肪割合は増加するとしている．また，ARC(1984)でも脂肪割合は育成雌牛の体重が増加するにつれ，より多くのエネルギーが脂肪として蓄積されると述べられている．本章の解析においても適温下前期牛より適温下後期牛は脂肪として蓄積する量が多い傾向にあり，これにより育成後期における k_g が高まったのであろう．日本飼養標準・乳牛(2007)によれば，ME の成長に対する利用効率 k_g

は給与飼料の q によって大きく変動するとされている．日本飼養標準・乳牛(2007)で用いられている k_g=0.84×q の式に，本解析に用いた摂取した飼料のそれぞれの q を代入すると，適温下育成前期は 47%で本解析の 46%とほぼ同じであったが，適温下育成後期は 49%で本解析の 52%より若干低かった．これらのことから，ME の成長に対する利用効率 k_gは，給与飼料の q だけではなく，育成ステージによっても影響を受ける可能性が示唆された．

本解析では高温下後期牛の ME_m および k_gの解析は行っていない．ME_m については，育成後期であっても高 ME 価の飼料を給与している条件では適温下と変わらないかもしれない．栗原ら(1995)も，ME_m に体温の恒常性を保つために必要なエネルギーを含めた場合には，高温時の ME_m は熱放散量の増大等にともなう熱増加量(HI)の上昇により増加するが，q の高い粗飼料は HI/MEI が少ない傾向にあり，ME_m の増加も少なかったと報告している．一方，高温下の育成後期における k_gについては，高温下前期牛の 56%よりも増加するかもしれない．なぜなら，育成後期は育成前期より体脂肪蓄積に配分されやすい上に，高温下では育成前期においてさえ体タンパク蓄積は低下することを考えると，採食量がそれほど低下しない緩やかな高温環境下かつ育成後期においては，体脂肪としての蓄積が大幅に増加する可能性が予想されるからだ．性成熟前後の高エネルギー飼料の給与は，体脂肪付着により乳腺発育を阻害するため，分娩後の乳生産に負の影響を与えることはよく知られている(Sejrsen ら 1982 ; Silva ら 2002)が，育成後期においても大幅な増体はそのまま過肥につながり，分娩時の難産，あるいは分娩後の発情回帰の遅れなど繁殖面でも負の影響を引き起こしかねない．さらに，高温環境下では，体内への過分な脂肪付着が懸念されるため，高温下での育成後期牛の高増体には特に気をつけるべきである．

4.5. 小括

ホルスタイン種育成雌牛 34 頭によるのべ 74 例のエネルギー出納成績をもとに，適温環境下の育成前期，および高温環境下の育成前期，ならびに適温環境下の育成後期における維持に要する代謝エネルギー量(ME_m)および代謝エネルギーの成長に対する利用効率(k_g)を比較解析した．適温下育成前期牛，高温下育成前期牛，適温下育成後期牛の ME_m に差はなく，平均で 524kJ/$BW^{0.75}$ であった．一方，高温環境下育成前期牛の k_gは，適温環境下育成前期牛より高い値であったが，これは，蓄積エネルギーが体タンパク質ではなく，体脂肪として蓄積されたためであることが示唆された．

5 章. 総合考察および結論

5.1. 温暖化の進行にともなう育成雌牛の夏季増体量の予測

温暖化がわが国の農林水産業に及ぼす影響について様々な分野で評価されている．米村ら(1998)は水稲を中心に気候変動予測値と作物の生育過程と気象との関係を表したモデルを組み合わせたシミュレーションを行い，その影響について報告した．果樹については，杉浦と横沢(2004)がリンゴとウンシュウミカンについて温暖化にともない栽培適地が北へ移動することを明確に示した．畜産においては，栗原ら(1995)が乳生産に及ぼす温暖化の影響評価をいち早く取り組んでおり，温暖化により夏季の平均気温が 2~4℃高まると，乳量は 10%程度低下し，夏季における生乳不足を予想している．温暖化により家畜の飼料となる牧草や飼料作物の生産性も影響を受ける。温暖化にといもなう伴う牧草の栽培適地と生産量の変動を予測した研究(佐々木 2005)によると，牧草の夏枯れ地域は拡大するが，暑熱に強い牧草(暖地型牧草)を栽培することにより，牧草全体では 1.5 倍の増収を予測している．しかし，暖地型牧草は，一般的に栄養価，消化率，嗜好性等が低いため，家畜生産への影響についてはさらなる検討が必要である．ブロイラー(山崎ら 2006)，肥育豚(高田ら 2008)については果樹で用いられた同じモデルを用いて予測しているが，ブロイラーでは，1971～2000 年の平均と比較して 2060 年代の 8 月には鶏肉生産の主要地域である九州地方では大きな影響を受け，また，もう一つの主要産地である東北地方においても負の影響が出始める可能性を示している．育成雌牛はブロイラーや肥育豚と比較して，生育期間が長いため，温暖化により夏季の平均気温が上昇しても，負の影響は小さいかもしれない．しかし，体タンパク質としての蓄積は低下することや，粗飼料の品質そのものが低下することを考慮すれば，温暖化の影響は決して少なくはない．

そこで，本研究 2 章では，夏季高温時における育成雌牛の摂取量および増体量に及ぼす高温の影響を実験的に明らかにし，月平均気温の変動予測シナリオから，高温による負の影響が及ぶ地域と程度を日本地図上に示した．その結果，育成雌牛の増体量は，気温 20℃ RH60%の時に比べ, 26.4℃で 5%, 28.8℃で 15%低下することが示された. その結果を 1970 年~2000 年の気象データにあてはめると，九州，近畿，東海，及び関東地方の一部において，8 月の増体量は適温期と比較して，5～15%の低下を示していた．そして，本研究の予測の結果，わが国の育成雌牛の夏季増体量は温暖化の影響を受け，2020，2040，2060 年と年代の経過にともない増体量の低下する地域は拡大することを新たに示した．

暑熱環境は，温度，湿度，そして気動(風)からなる．特にウシは高温下では高湿の影響を大きく受ける(Bianca 1962; 三村ら 1971)．本研究 2 および 3 章で示したように，RH60%

では体重 200kg 台の育成雌牛に高温の影響はほとんど認められなかったが，RH を 80%に高めた場合，DMI が低下し，増体量は大きく減少した．夏季間の平均 RH が 70%を越えるような日本の場合，温暖化による育成雌牛の生産性への影響を予測する際に，温度だけでなく湿度を加味することが必須である．しかし，温暖化にともなう RH の将来予測に関しては未だ一致した知見は得られておらず，また，気温のような細かいメッシュごとの予測も行われていない．そこで，相対湿度が増加した場合の予測を，日本の北部(北海道中東部地域)と南部(南九州地域)において試みた．その結果，2060 年代まで北海道中東部地域では日増体量に低下は認められないが，南九州地域においては，適温期と比較して 25%以上低下することが新たに予測された．さらに，湿度による負の影響は，畜産に限らず，作物の蒸散機構等にも深く関わっているため，今後構築されるであろう予測モデルに対し，農業分野においては湿度の影響を組み込むよう要望を挙げるとともに，その動向に注意を払うべきであろう．

以上の結果より，夏季の暑熱対策は搾乳牛だけでなく，育成雌牛にも今後は必要となることが示された．温暖化はこれからさらに進行することが予測されるが，既存の暑熱対策技術でどこまで対応可能なのか，そして短期的に，または中長期的に対応できることは何であるかを明確にすることは非常に重要である．家畜はその品種，月齢，性別，体格によっても暑熱に対する反応は異なり，またウシでは湿度の影響も大きいため，今後も引き続き詳細な検討に取り組む必要がある．その際，現在は，温暖化に関して家畜生産への負の影響ばかりに焦点を当てているが，冬季の気温上昇が家畜の生産性に及ぼす正の影響も考えられるため，周年でも検討していくべきである．さらに，畜産は，土－草－家畜の農業体系を持つため，温暖化の進行による飼料生産への影響も加味して考えることも重要である．将来の温暖化の進行程度は，今からの社会のあり様により変わっていくため，気象分野や他の農業分野と連携して，常に新しい予測モデルで再検討することがのぞまれる．

5.2. 暑熱が春機発動前の育成前期雌牛における体蓄積配分に及ぼす影響

乳量の増加にともない，乳牛の体格は向上してきたが、平均初産分娩月齢は 25～26 ヶ月とここ 20 年ほとんど変わっていない。育成に給与する飼料に要するコストは酪農経営全体の 15～20%といわれており(Heinrichs 1993)，初産分娩月齢の短縮化は，酪農経営の低コスト化には必要な技術であり，古くから取り組まれてきているものの，現実にはそれほど短縮化は進んでいない．これは一つには，早期育成の方法としての高栄養飼料の給与が，乳生産成績に負の影響を及ぼすと懸念されていることが挙げられる．Sejrsen ら(1982)は，春機発動前に高エネルギー飼料を自由採食させ DG が 1.2kg の育成雌牛は，同じ飼料を制

限給与して DG を 0.6kg に抑えた育成雌牛と比較し，乳腺への脂肪蓄積が増加し，乳腺実質の DNA 量は低下するため，乳腺組織の発達が阻害されたことを示し，また，Silva ら(2002)は，乳腺実質の DNA 含量は体脂肪率と負の相関があることを報告した．さらに，育成時の高エネルギー飼料の給与は，分娩時の過肥および分娩後の代謝病を誘発する(Grummer ら 1995)との報告もあった．

一方で, Kertz ら（1987)は 3～12 ヵ月齢の育成雌牛において DG1.0kg までは過肥にならないと述べ, Whitelock ら(2002)は給与飼料のエネルギーとタンパク質の割合をともに高めると，乳腺実質の発達は妨げないことを示した．わが国においても，高エネルギー，高タンパク質飼料の給与により 24 ヵ月齢前の初産分娩が可能であり(野中ら 2000)， TDN 含量 68%，CP 含量 14%に設定した給与飼料により DG1.0kg 以下に制御すると初産分娩月齢の早期化と適正な乳生産が可能であること(Ishii ら 2011)が明らかになっている．これらのことから，早期育成を行う場合は給与飼料のエネルギーとタンパク質をバランスよく給与すること，特に，春機発動前の栄養管理は乳腺発育への影響が大きいため過肥にならないようにすることは極めて重要と考えられる．

本研究では，3 章 1 節において，春機発動前のホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭を用い，環境温度 20℃を対照とし，28℃および 33℃の高温環境(RH60%)が育成雌牛の生理応答，代謝，および生産に対する反応を検討した．その結果，環境温度が 20℃から 28℃に高まると飼料摂取量および日増体量は変わらないものの，摂取エネルギーは体タンパク質より体脂肪として多く蓄積することが示された．高温環境により乳用種育成雌牛の代謝が体脂肪蓄積に傾く場合は，乳腺発育の阻害，それに続く乳生産の低下が起こる可能性が考えられ，将来高泌乳を期待される雌牛として望ましくないことが示唆された．

一方，暑熱環境下の乳牛や肥育牛では尿中への N 排泄割合が高まると報告されている(White ら 1992; 寺田ら 1999; Obitsu ら 2011)．Obitsu ら(2011)は泌乳牛で尿素態窒素の動態を調べた結果，暑熱下では N 摂取量あたりの肝臓における尿素合成量は増加するが，血液から消化管への尿素移行率は低下するため BUN 濃度は上昇し, 腎臓から尿としての N 排泄量が増加すると述べている．また，乳牛における血漿中のクレアチニン濃度および尿中への窒素排泄量は適温下より高温下の方が高いが，それは，筋肉分解の増加とタンパク質合成の低下が原因と考えられている(Schneider ら 1988; Kellaway and Colditz 1975)．これらのことから，春機発動前の育成期における高温環境は，体タンパク質蓄積が低下することによる育成期の発育停滞，さらに脂肪付着による乳腺発育阻害の面から，乳用種雌牛にとって大きな問題であることが考えられた．

暑熱環境下の育成雌牛において体タンパク質蓄積の低下を抑制するような，あるいは，

体脂肪としての蓄積を回避するような栄養管理が望まれる．Bunting ら(1996)は，3 ヵ月齢のホルスタイン種雄子牛においてアミノ酸のバランスを高めたルーメン内非分解性タンパク質(RUP)の給与は，暑熱下での増体量を高めると報告しており，RUP は体タンパク質としての増体を高める可能性が考えられた．一方，Tedeschi ら(2002)は，ネローレ種牛を供試した比較屠殺試験において，蓄積エネルギーに対する体タンパク質割合の相関を調べたところ，雄牛は負の相関があり，去勢牛は相関がなかった．これは，雄牛ではエネルギーの過剰給与分は体脂肪として蓄積されるが去勢牛では給与量にかかわらずほとんどが体脂肪として蓄積されること，すなわち体タンパク質蓄積の様相およびメカニズムは雄牛と去勢牛では異なることを示しており，そうだとすれば雌牛もまた異なる可能性をがある．このように，暑熱下での育成雌牛の体タンパク質蓄積を高めるような報告は今のところ見当たらないが，暑熱下における春機発動前の育成雌牛に有効な飼料メニューは，今後の検討されるべきテーマの一つとなり得る．

5.3. 暑熱下における育成雌牛の維持および成長に要する代謝エネルギー量

一般的に暑熱下では，過剰な熱を放散させるのにエネルギーを必要とするため，ME_m は増加すると考えられている(NRC 1996)．また，熱放散のためのパンティングや血流量の増加はエネルギー消費量を増加させるが，DMI の減少，選択採食，代謝率の低下等は熱生産を減少させることも知られており(NRC 2001)，暑熱によりウシの行動や代謝は変化する(West 1999)．本研究 4 章において，育成前期雌牛の ME_m を適温と高温で比較したところ，両者に差は認められなかった．その理由として，本研究では，平均 q 値が 58%という DG0.8～0.9k の増体を目的とした飼料を供試したことにあると考えられた．このような飼料の場合，緩やかな暑熱下では DMI の若干の低下は認められても，飼料の通過速度の低下にともなう消化率の上昇等で，エネルギー消費量の増加分を補填していたものだろう．栗原ら(1995)も高温時における ME_m の増加程度は給与飼料の質に影響されると報告しており，本研究では，消化吸収効率の高い良質飼料を給与した場合は，高温環境下でも育成雌牛の ME_m は増加しないことを明らかにした．

同様に本研究は，成長に対する ME の利用効率である k_g は，適温下より高温下で高いことを示した．適温下より高温下で効率が良いのは一見矛盾しているような結果であるが，これには，エネルギーの配分が関与する．NRC(2001)によれば，体重の増加にともない増体のエネルギー含量は増加するが，これは体タンパク質と比較して体脂肪分としての蓄積が増加するためであるが，これと同じ様なことが暑熱下でも起きていると考えられる．本研究第 4 章において，体タンパク質と体脂肪の蓄積エネルギーの配分比を求めたところ，

適温下では 1：1 に対し，高温下では 1：1.3 であり，高温下では体脂肪への配分割合が増加し，この解析結果は，本研究 3 章で得られた結果と同じであった．以上より，暑熱下では，体脂肪としての蓄積配分が高まるため，育成前期雌牛の k_gは増加することを明らかとした．

5.4. 暑熱下育成雌牛における適正飼料給与技術

本研究の 3 章および 4 章から，暑熱下では，育成前期は体タンパク質蓄積が低下すること，育成後期では，採食量，中でも粗飼料採食量が低下することが問題であることが明らかになった．そこで，本節では暑熱下育成雌牛に有効な飼料給与メニューについての可能性を探るために，以下の検討を行った．

5.4.1. 暑熱下で粗飼料摂取量を確保する

まず，実験 2b の結果より，育成後期では採食量，特に粗飼料採食量の低下が，増体量の低下を導くという問題点が明らかになった．採食量の低下は体温の上昇と深い関係があることが想定されたので，体温と粗飼料の主要成分である NDF の摂取量の関係を，本実験 1b～3b の結果で検証した．その結果，体温の上昇とともに粗飼料由来の NDF 摂取量の低下は明らかであった（図 5-1）．これは，NDF 含量が低い飼料ほど暑熱下での採食量を確保できる可能性を示している．

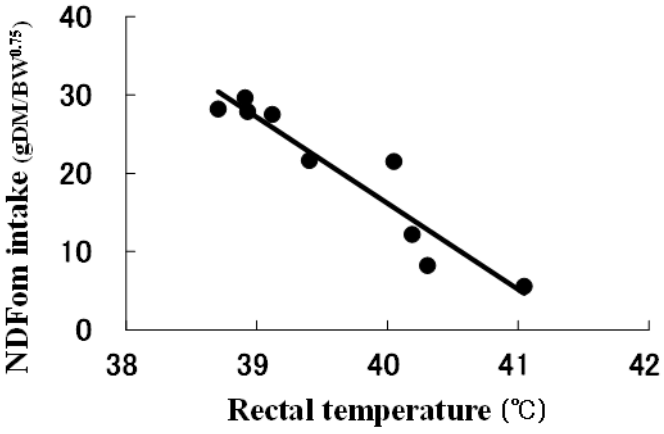

Figure 5-1 Relationship between rectal temperature and NDF intake of heifers.

一方，環境温湿度の指標となる体感温度(Bianca 1962)と代謝体重あたりの NDF 摂取量の関係を実験 1b～3b において調べたところ，体感温度の上昇にともなう NDF 摂取量の低下のパターンが実験間で異なっていた．実験 1b，2b，3b で供試したイタリアンライグラスサイレージの NDF 含量は，それぞれ 61.1，66.7，60.0%であったが，体感温度の上昇にともない，実験 1b の代謝体重あたりの NDF 摂取量は緩やかに低下し，一方，実験 2b の NDF 摂取量は急激に低下した(図 5-2)．体重など動物側の要因も考えられるが，NDF 含量だけが採食量を左右するわけではない可能性が示唆された．

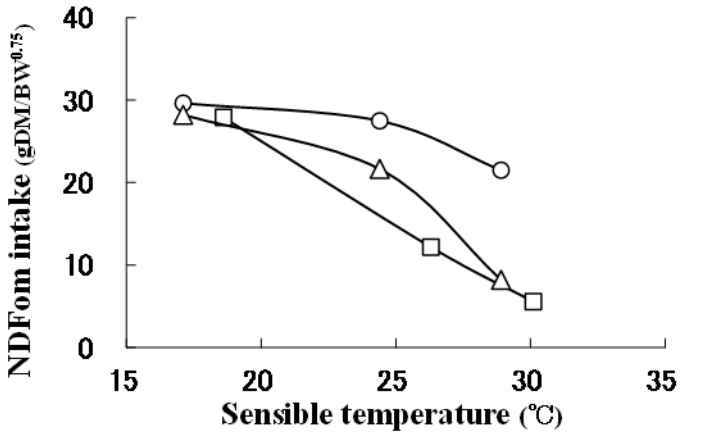

Figure 5-2 Relationship between sensible temperature and NDF intake of heifers.
Sensible temperature: dry-bulb temperature × 0.35
＋wet-bulb temperature × 0.65 (Bianca 1962)
○: experiment 1b, □: experiment 2b, △: experiment 3b

暑熱下では飼料の第一胃内滞留時間の増加と第一胃容積の増大が観察されており，第一胃内消化による飼料の分解速度が採食量に影響を与えている可能性が考えられた．そこで，実験 1b～3b に供試したイタリアンライグラスサイレージの第一胃内分解速度をナイロンバッグ法により測定した（図 5-3）．その結果，実験 2b で供試した NDF 含量の高いイタリアンライグラスサイレージの第一胃内 NDF 分解速度が最も遅く，48 時間での NDF 分解割合も 57%と最も低かった．

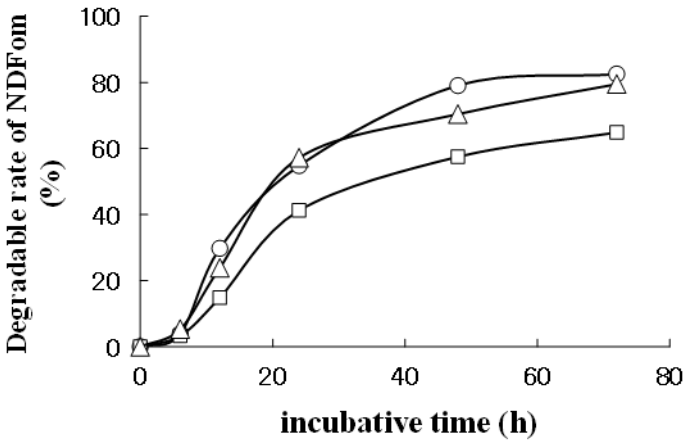

Figure 5-3 NDF degradable rate of Italian ryegrass in rumen.
○: experiment 1b, □: experiment 2b, △: experiment 3b

以上のことから，暑熱下での粗飼料採食量の低下には，粗飼料の NDF 含量だけではなく，NDF 分解速度も大きく関わっている可能性が示された．NDF 含量の低い粗飼料として考えられるのは寒地型牧草である．また，暖地型牧草であっても，早刈りにすることで NDF 含量を低く，NDF 分解速度を高める粗飼料を作ることは可能であろう．もちろん粗飼料の種類だけでなく，調製法や切断長等も採食量に関わり，例えば，暑熱下でのサイレージ利用は二次発酵による変敗で採食量を低下させる可能性が考えられるし，切断長をできるだけ短くすることで採食量の低下を抑制できるであろう．それらに加え，NDF 含量が低く，NDF 分解速度の高い高品質な粗飼料を夏季に給与することで，暑熱下での採食量低下を抑制できると考える．

5.4.2. 暑熱下での体タンパク質蓄積を促進する飼料メニューの可能性

本研究 3 章の結果から，暑熱下では飼料の第一胃内滞留時間の増加が観察されており，滞留時間の延長は飼料タンパク質の第一胃内分解量の増大を引き起こしている可能性がある．実験 1b～3b において，第一胃内溶液ではアンモニア態窒素濃度の増加，血液では BUN の増加が認められた．第一胃内でアンモニアが過剰に生産されるとその排泄に余分のエネルギーを必要とするため，生産性が低下する(Higginbotham ら 1989)ことを踏まえると，バイパスタンパク質での給与の有効性が考えられる．Bunting ら(1996)は，3 ヵ月齢のホルスタイン種雄子牛においてアミノ酸のバランスを高めた RUP の給与は，暑熱下での増体量を高めると報告している．したがって，嗜好性の良いバイパスタンパク質の補給によって暑熱時の体タンパク質蓄積を改善する可能性はあると考えられる．二つ目として，第一胃内におけるタンパク質分解と炭水化物分解の同調により，第一胃内での微生物体タンパク質合成を高め，下部消化管へ流出するタンパク質量を増加させ，そのことにより体タンパク質蓄積を高める方法も考えられる．三つ目として，第一胃内の水分回転率を向上させ pH 低下を抑制することによる第一胃内環境の改善を目指した食塩(NaCl)の添加も考えられる．また，本州などの場合，育成雌牛には自給飼料ではなく，輸入乾草を給与することも多いが，輸入乾草は CP 含量だけでなくミネラル分も不足しがちであることを考えると，陽イオン添加による体内のアシドーシス傾向の是正も有効かもしれない．今後，これらの可能性について検討する必要がある．

5.5. 結論

わが国各地において 2060 年までに予測されるホルスタイン種育成雌牛の日増体量低下は 15%以上であること，また増体量の低下する地域も拡大することを示した上で，従来は限定的であると考えられてきた育成雌牛の生産へ及ぼす暑熱の影響について詳細に検討し，育成雌牛の生理応答を通して日増体量を大きく低下させることを明らかにした．特に，高温環境において育成雌牛の体脂肪蓄積の増加のために体蓄積効率は高まることと，高増体・高エネルギー価の飼料条件下では維持エネルギー要求量は変化しないことを明確に示した．これらにより，暑熱環境下では高温時の育成雌牛のエネルギー要求量と体蓄積配分の特性を考慮した飼料設計が必要であることが示唆された．

要　約

夏季高温時における泌乳牛の生産低下と比べ，育成雌牛への高温による負の影響は大きくないとして今まで問題にされてこなかった．しかし，最近の育成雌牛は，初産分娩の早期化による増体速度の上昇や分娩時体重の増加，体格の大型化等により，従来の育成雌牛より高温による負の影響を受けやすいと考えられる．一方，地球規模での温暖化の進行は，これまで経験しなかったような夏季気温の上昇や高温期の延長などが懸念されており，育成雌牛にとっても過酷な暑熱環境となりつつある．したがって，地球温暖化にともなう将来の育成雌牛の生産性変化を予測し，現在の育成雌牛に及ぼす高温の影響とその程度を正確に把握することが重要である．さらに，夏季高温時において育成雌牛を効率よく増体させるためには，育成雌牛における高温時のエネルギー要求量と体蓄積配分を精密に推定することが求められ，それにより飼料給与の面から暑熱対策を講じる必要がある．

本研究ではまず，１）わが国における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を予測し，その上で，２）高温環境が育成雌牛の生理応答および代謝に及ぼす影響について育成ステージ別に詳細に検討した．さらに，３）これらのデータを統合し，高温環境下の育成雌牛における代謝エネルギーの維持要求量と体蓄積配分を推定した．

１）温暖化がホルスタイン種育成雌牛の増体に及ぼす影響を予測するための基礎データを得るため，ホルスタイン種育成雌牛を用いて温度および湿度の上昇と増体量の関係を検討した．その結果，育成雌牛の日増体量は，相対湿度（RH）60%下では，気温 20℃時に比べ，26.4℃時で 5%，28.8℃時で 15%低下することが示された．このデータを用いて，月平均気温の変動予測シナリオから，わが国の育成雌牛に日増体量に対する温暖化にともなう 8 月の高温の影響を，国内の地域ごとに検討した． 過去のデータによれば，1970 年~2000 年では，九州，近畿地方，東海地方および関東の一部において 8 月の日増体量は適温期と比較して 5～15%の低下が示されている．しかし，本研究の予測の結果，2060 年代には日増体量が 15%以上低下する地域が西日本および東海，北陸，関東まで拡大することが新たに示された．さらに，21 世紀後半に RH が現在より 5%単位上昇した場合には，北海道中東部地域においては日増体量に変化はないが，南九州地域においては日増体量は 25%以上低下することが予測された．以上の結果から，わが国のホルスタイン種育成雌牛の夏季の増体量は，2060 年まで年代が進むにつれ日増体量が低下し，その低下する地域が拡大する可能性があること，また，RH の上昇が加わると日増体量低下に及ぼす影響は，南九州地域では深刻なものとなることが明らかとなった．

２）高温環境がホルスタイン種育成雌牛の生理応答，窒素・エネルギー代謝に及ぼす影響を育成ステージ別に検討するため，以下の 3 つの試験を実施した．

最初に，春機発動前のホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭を用い，環境温度 20℃を対照とし，28℃および 33℃の高温環境(RH60%)が育成雌牛の生理，代謝，および生産に対する反応を検討した．その結果，環境温度が 20℃から 28℃に高まっても飼料摂取量および日増体量は変わらないものの，摂取エネルギーは体タンパク質より体脂肪として多く蓄積することが示された．環境温度が 33℃まで高まると，20℃および 28℃と比較して，飼料消化率は増加するが，飼料摂取量，日増体量，および体タンパク質蓄積量は低下した．これらから，育成前期雌牛の RH60%下における高温環境は，28℃時では蓄積エネルギーの体脂肪への配分が増加するにとどまり，高温に対する生産の応答は 33℃時で表れることが明らかとなった．

次に，高温環境下における湿度上昇が育成前期雌牛の生理応答および窒素･エネルギー代謝に及ぼす影響を明らかにするために，ホルスタイン種育成前期雌牛 4 頭を用い，RH80%下において，環境温度を 20，28，33℃と順次負荷する実験を行った．その結果，28℃時において体温および呼吸数の増加，飼料摂取量の低下，血漿中の尿素態窒素濃度の増加，総コレステロール，グルコース，甲状腺ホルモン濃度およびアルカリフォスファターゼ活性の低下が認められた．窒素およびエネルギー蓄積量は，環境温度の上昇とともに有意に減少した．これらから，RH80%下では，育成前期雌牛における高温に対する生産および生理の応答は 28℃から認められ，33℃ではさらに大きくなることが明らかとなった．

さらに，春機発動後の育成後期雌牛 4 頭を用い，環境温度 20℃，28℃，33℃の高温環境（RH60%）を順次負荷し，生理応答，窒素およびエネルギー出納に及ぼす影響を検討した．その結果，28℃から呼吸数および体温の増加，粗飼料の摂取量の減少が認められ，33℃では，乾物および粗タンパク質消化率の増加，消化管における固相の滞留時間の増加，血漿中トリヨードサイロニン濃度およびアルカリフォスファターゼ活性が低下した．窒素出納は 28℃から影響を受け，尿への窒素排泄割合は高まった．脂肪およびタンパク質への体蓄積配分は，20℃においても体脂肪の蓄積割合が高く，高温でも体脂肪蓄積割合は高かった．これらから，育成後期雌牛では，RH60%下でも，28℃以上で高温に対する生産および生理の応答が認められることが明らとなった．

３）高増体（日増体量 0.8～0.9kg）に設定した飼料条件下で実施したホルスタイン種育成雌牛 22 頭によるのべ 53 例のエネルギー出納成績をもとに，育成前期雌牛における，適温環境下および高温環境下における維持に要する代謝エネルギー量(ME_m)および代謝エネ

ルギーの成長に対する利用効率(k_g)を，代謝エネルギー摂取量(MEI)および蓄積エネルギー量(RE)を用いた回帰分析により推定した．その結果，適温下では，RE＝0.456×MEI －245 (R^2＝0.927)が導かれ，ME_m および k_g はそれぞれ，538±158kJ/$BW^{0.75}$ および 46±7%と推定された．一方，高温下では，RE＝0.564×MEI－298 (R^2＝0.806)が導かれ，ME_m および k_g はそれぞれ，529±50kJ/$BW^{0.75}$ および 56±3%と推定された．これらから，適温下に比べて高温下では ME_m に差はなく，k_g が 10%単位高まることが示された．一方，体タンパク質と体脂肪の蓄積エネルギーの配分比は，適温下では 1:1 に対し，高温下では 1:1.3 であり，高温下で体脂肪への配分割合が増加した．以上の結果から，日増体量 0.8～0.9kg と高い増体を見込んだ高エネルギー価の飼料条件下では，高温下でも育成前期雌牛の ME_m は増加しないが，体脂肪としての蓄積配分が高まるため k_g は増加することが明らかとなった．

以上のように本研究は，わが国各地において 2060 年までに予測されるホルスタイン種育成雌牛の日増体量低下は 15%以上であること，また増体量の低下する地域も拡大することを示した上で，従来は限定的であると考えられてきた育成雌牛の生産へ及ぼす暑熱の影響について詳細に検討し，育成雌牛の生理応答を通して日増体量を大きく低下させることを明らかにした．特に，高温環境において育成雌牛の体脂肪蓄積の増加のために体蓄積効率は高まることと，高増体・高エネルギー価の飼料条件下では維持エネルギー要求量は変化しないことを明確に示した．これらにより，暑熱環境下では高温時の育成雌牛のエネルギー要求量と体蓄積配分の特性を考慮した飼料設計が必要であることが示唆された．

引 用 文 献

Abeni F, Calamari L, Stefanini L. 2007. Metabolic conditions of lactating Friesian cows during the hot season in the Po valley. 1. Blood indicators of heat stress. *International Journal of Biometeorology* **52**, 87-96.

Agricultural Research Council (ARC). 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. *Energy Value of Body Components*. CAB International, Wallingford, UK.

Allen JD, Hall LW, Collier J, Smith JF. 2015. Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. *Journal of Dairy Science* **98**, 118-127.

Alnaimy A, Habeeb P, Fayaz M, Marai M, Kamel TH. 1992. Heat stress. In: Phillips C, Piggins D (eds), *Farm Animals and the Environment*. CAB International, Wallingford, UK.

AOAC, 2000. Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C. Arlington, VA.

Armstrong DV. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science* **77**, 2044-2050.

Baccari F Jr, Johnson HD, Hahn GL. 1983. Environmental heat effects on growth, plasma T_3, and postheat compensatory effects on Holstein calves. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine* **173**, 312–318.

Badinga L, Collier RJ, Thatcher WW, Wilcox CJ. 1985. Effects of climatic and management factors on conception rate of dairy cattle in subtropical environment. *Journal of Dairy Science* **68**, 78-85.

Beede DK, Collier RJ. 1986. Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress. *Journal of Animal Science* **62**, 543–554.

Berman A. 2011. Invited review: Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates? *Journal of Dairy Science* **94**, 2147-2158.

Bernabucci U, Bani P, Ronchi B, Lacetera N, Nardone A. 1999. Influence of short- and long-term exposure to a hot environment on rumen passage rate and diet digestibility by Friesian heifers. *Journal of Dairy Science* **82**, 963-973.

BiancaW. 1962. Relative importance of dry- and wet- bulb temperatures in causing heat stress in cattle. *Nature* **195**, 251-252.

Birkelo CP, Johnson DE, Phetteplace HP. 1991. Maintenance requirements of beef cattle as affected by season on different planes of nutrition. *Journal of Animal Science* **69**, 1214–1222.

Bohmanova J, Misztal I, Cole JB. 2007. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *Journal of Dairy Science* **90**, 1947-1956.

Brouwer E. 1965. Report of sub-committee on constants and factors. In: Blaxter KL (ed.), *Energy Metabolism*. pp. 442–443. Academic Press, London.

Brown-Brandl TM, Eigenberg RA, Nienaber JA. 2006. Heat stress risk factors of feedlot heifers. *Livestock Science* **105**, 57-68.

Buffington DE, Collazo-Arocho A, Canton GH, Pitt D, Thatcher WW, Collier RJ. 1981. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Transactions of ASAE* **24**, 711-714.

Bunting LD, Fernandez JM, Fornea RJ, White TW, Froetschel MA, Stone JD, Ingawa K. 1996. Seasonal effects of supplemental fat or undegradable protein on the growth and metabolism of Holstein calves. *Journal of Dairy Science* **79**, 1611-1620.

Cameron MR, Klusmeyer TH, Lynch GL, Clark JH. 1991. Effects of urea and starch on rumen fermentation, nutrient passage to the duodenum, and performance of cows. *Journal of Dairy Science* **74**, 1321-1336.

Cargill BF, Stewart RE, Johnson HD. 1962. Environmetanl physiology and shelter engineering. LXIII. Effect of humidity on total room heat and vapor dissipation of Holstein cows at 65, 80, and 90℉ . *Missouri. Agricultural Experiment Station and the United States Depertment of Agriculture Cooperating Research Bulletin* **794**, 1–32.

Cavestany D, el-Wishy AB, Foote RH. 1985. Effect of season and high environmental temperature on fertility of Holstein cattle. *Journal of Dairy Science* **68**, 1471–1478.

Christon R. 1988. The effect of tropical ambient temperature on growth and metabolism in pigs. *Journal of Animal Science* **66**, 3112–3123.

Christopherson RJ. 1985. The thermal environment and the ruminant digestive system. In: Yousef, M.K. (Ed.), Stress Physiology in Livestock. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 163–180.

Christopherson RJ, Kennedy PM. 1983. Effect of the thermal environment on digestion in ruminants. *Canadian Journal of Animal Science* **63**,477–496.

Colditz PJ, Kellaway RC. 1972. The effect of diet heat stress on feed intake, growth, and nitrogen metabolism in Friesian, F1 Brahman×Friesian, and Brahman heifers. *Australian Journal of Agricultural Research* **23**, 717–725.

De Rensis F, Scaramuzzi RJ. 2003. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow. *Theriogenology* **60**, 1139-1151.

El-Fouly HA, Kamal TH. 1979. Effect of short-term heat exposure on urinary allantoin-N in Friesian calves. *World Review of Animal Production* **15**, 61–64.

Flamenbaum I, Wolfenson D, Kunz PL, Maman M, Berman A. 1995. Interactions between body condition at calving and cooling of dairy cows during lactation in summer. *Journal of Dairy Science* **78**, 2221–2229.

Fraser D. 1957. Hypophosphatasia. *American Journal of Medicine* **22**, 730-746.

Gitay H, Brown S, Easterling A, Jallow B. 2001. Ecosystems and their goods and services. In: McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (Eds.), Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, p. 257.

Grovum WL, Williams VJ. 1973. Rate of passage of digesta in sheep. 4. Passage of marker through the alimentary tract and the biological relevance of rate-constants derived from the changes in concentration of marker in feces. *British Journal of Nutrition* **30**, 313–329.

Grummer RR. 1995. Impact of changes in organic nutrient metabolism on feeding the transition dairy cow. *Journal of Animal Science* **73**, 2820–2833.

Hart SP, Polan CE, 1984. Simultaneous extraction and determination of ytterbium and cobalt ethylenediaminetetraacetate complex in feces. *Journal of Dairy Science* **67**, 888–892.

橋爪徳三，増淵敏彦，浜田龍夫，安部道夫，千葉 博，横田千尺．1963a．牛のエネルギー代謝に関する研究 Ⅰ．乾乳牛の安静時代謝におよぼす環境温度の影響．畜産試験場研究報告 **2**，61-68.

橋爪徳三，浜田龍夫，増淵敏彦，横田千尺．1963b．牛のエネルギー代謝に関する研究 Ⅱ．乾乳牛の安静時代謝におよぼす妊娠の影響．畜産試験場研究報告 **3**，121-124.

橋爪徳三，加藤道弘，針生程吉，辰巳 博，増淵敏彦，波田野松重．1966．牛のエネルギー代謝に関する研究 Ⅲ．和牛の安静時代謝におよぼす環境温度の影響．畜産試験場研究報告 **11**，39-48.

橋爪徳三，針生程吉，増淵敏彦，加藤道弘，辰巳 博，森本宏，波田野松重．1967a．肉牛の飼養標準に関する研究 Ⅰ．和牛の維持時における養分要求量におよぼす環境温度の影響．畜産試験場研究報告 **13**，11-22.

橋爪徳三，針生程吉，伊藤 稔，増淵敏彦，堀井 聰，田辺 忍，森本 宏．1967b．肉牛の飼養標準に関する研究 Ⅰ．和牛の維持養分要求量に関する研究．畜産試験場研究報告 **13**，23-40.

Heinrichs AJ. 1993. Raisiong dairy replacements to meet the needs of the 21st century. *Journal of Dairy Science* **76**, 3179-3187.

林陽生，石郷岡康史，横沢正幸，鳥谷均，後藤慎吉．2001．温暖化が日本の水稲栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト．地球環境 **6**，141-148.

Higginbotham GE, Torabi M, Huber JT. 1989. Influence of dietary protein concentration and degradability on performance of lactating cows during hot environmental temperatures. *Journal of Dairy Science* **72**, 2554-2564.

樋口浩二，田鎖直澄，野中最子，田島　清，都丸友久，大谷文博，小林洋介，石川哲也，栗原光規，永西　修．2015．イネホールクロップサイレージを給与した乾乳牛の維持に要する代謝エネルギー量のエネルギー出納および行動解析に基づく推定．日本畜産学会報 **86**，169-177.

Hong BJ, Broderick GA, Koegel RG, Shinners KJ, Straub RJ. 1988. Effect of shreddinf Alfalfa on cellulolytic activity, digestibility, rate of passage, and milk production. *Journal of Dairy Science* **71**, 1546–1555.

堀清記．1981．温度適応．In：中山昭雄(ed.)，温熱生理学．第１版．pp．491-499．理工学社，東京.

Hotovy SK, Johnson KA, Johnson DE, Carstens GE, Bourdon RM, Seidel GE Jr. 1991. Variation among twin beef cattle in maintenance energy requirements. *Journal of Animal Science* **69**, 940–946.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Global Climate Projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Marquis M, Averyt K, Tignor M, Miller HL, Chen Z (eds), *The Physical Science Basis*, pp. 747-845. Cambridge University Press, New York.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate Change 2013: Summary for Policymakers. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. (eds) Cambridge University Press, New York.

Ishii T, Kawashima K, Oribe H, Ueda H, Hasunuma T, Akiyama K, Nakayama H, Kurihara M, Terada F, Kushibiki S. 2011. Effects of growth and dietary crude protein level until first insemination on milk production during first lactation in Holstein heifers. *Animal Science Journal* **82**, 741–746.

Itoh F, Obara Y, Fuse H, Rose MT, Osaka I, Takahashi H. 1998. Effects of heat exposure on plasma insulin, glucagon and metabolites in response to nutrient injection in heifers. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C* **119**, 157–164.

伊藤稔，田野良衛．1977．助燃剤をかねた容器としてポリエチレンフィルムを用いた未乾燥糞および尿の熱量分析法の検討．畜産試験場研究報告 **32**，39-43.

岩崎和雄，針生程吉，田野良衛，寺田文典，伊藤稔，亀岡暄一．1982．畜産試験場に新設した家畜代謝実験装置について．畜産試験場研究報告 **39**, 41-78.

岩崎和雄 1986．黒毛和種牛の妊娠時におけるエネルギー代謝とエネルギー利用効率．畜産試験場研究報告 **45**，25-92.

JMP® 11. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Johnson HD. 1980. Environmental management of cattle to minimize the stress of climatic change. *International Journal of Biometeorology* **24** (Suppl.), 65-78.

Johnson HD, Li R, Manalu W, Spencer-Johnson KJ, Becker BA, Collier RJ, Baile CA. 1991. Effects of somatotropin on milk yield and physiological responses during summer farm and hot laboratory conditions. *Journal of Dairy Science* **74**, 1250–1262.

Johnson HD, Ragsdale AC, Berry IL, Shanklin MD. 1962. Environmetanl physiology and shelter engineering. LXII. Effect of various temperature-humidity combinations on milk production of Holstein cattle. *Missouri. Agricultural Experiment Station and the United States Depertment of Agriculture Cooperating Research Bulletin* **791**, 1–39.

Kadzere CT, Murphy MR, Silanikove N, Maltz E. 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livestock Production Science* **77**, 59–91.

Kamiya M, Kamiya Y, Tanaka M, Oki T, Nishiba Y, Shioya S. 2006. Effects of high ambient temperature and restricted feed intake on urinary and plasma 3-methylhistidine in lactation Hostein cows. *Animal Science Journal* **77**, 201–207.

Katsumata M, Kaji Y, Saitoh M. 1996. Growth and carcass fatness responses of finishing pigs to dietary fat supplementation and at a high ambient temperature. *Animal Science* **63**, 591–598.

Kellaway RC, Colditz PJ, 1975. The effect of heat stress on growth and nitrogen metabolism in Friesian and F1 Brahman × Friesian heifers. *Australian Journal of Agricultural Research* **26**, 615-622.

Kertz AF, Prewitt LR, Ballam JM. 1987. Increased weight gain and effects on growth parameters of Holstein heifer calves from 3 to 12 months of age. *Journal of Dairy Science* **70**, 1612–1622.

Kibler HH, Yeck RG, Berry IL. 1962. Environmetanl physiology and shelter engineering. LX. Vaporization rates in Brown swiss, Holstein, and Jersey calves during growth at constant 50° and 80° temperatures. *Missouri. Agricultural Experiment Station and the United States Depertment of Agriculture Cooperating Research Bulletin* **792**, 1–28.

Kibler HH. 1962. Environmetanl physiology and shelter engineering. LXI. Energy metabolism and related thermoregulatory reactions to thermal stress in 50° and 80° acclimated dairy heifers. *Missouri. Agricultural Experiment Station and the United States Depertment of Agriculture Cooperating Research Bulletin* **793**, 1–32.

Kibler HH. 1964. Environmetanl physiology and shelter engineering. LXVII. Thermal effects of various temperature-humidity combination on Holstein cattle as measures by eight physiological responses. *Missouri. Agricultural Experiment Station and the United States Depertment of Agriculture Cooperating Research Bulletin* **862**, 1–40.

Kielanowski J. 1965. Estimates of energy cost of protein and fat deposition in growing animals, In : Blaxter KL (Ed.). *Energy Metabolism* **11**, 13–20.

気象庁．2002．メッシュ気候値 2000．財団法人気象業務センター，東京．

Koluman N, Daskiran I. 2011. Effects of ventilation of the sheep house on heat stress, growth and thyroid hormones of lambs. Tropical Animal Health and Production. *Tropical Animal Health and Production* **43**, 1123-1127.

Kubena LF, Lott BD, Deaton JW, Reece FN, May JD. 1972. Body composition of chicks as influenced by environmental temperature and selected dietary factors. *Poultry Science* **51**, 517–522.

Kubena LF, Deaton JW, Chen TC, Reece FN. 1974. Factors influencing the quantity of abdominal fat in broilers. *Poultry Science* **53**, 211–214.

栗原光規，久米新一，相井孝允，高橋繁男，柴田正貴，西田武弘．1995．気候温暖化に対応した乳牛の飼養法－エネルギー代謝に基づく技術評価－．九州農業試験場報告 **29**, 21-107.

栗原光規，久米新一，柴田正貴，高橋繁男，相井孝允．1990．乾草維持給与時における乾乳牛のエネルギー代謝に及ぼす環境温度の影響．日本畜産学会報 **61**，315-321.

栗原光規，久米新一，高橋繁男，相井孝允．1991．維持給与水準における乾乳牛のエネルギー代謝に及ぼす給与粗飼料と環境温度の影響．日本畜産学会報 **62**，375-382.

栗原光規，柴田正貴，向居彰夫．1984．濃厚飼料多給時における乳牛の水分出納に及ぼす環境温度の影響．家畜の管理 **20**，61-67.

栗原光規，高橋繁男，相井孝允，久米新一．1992．泌乳牛のエネルギー代謝に及ぼす環境温度の影響－サイレージおよび乾草給与時－．日本畜産学会報 **63**，831-839.

Kurihara M, Takahashi S, Kume M, Aii T. 1989. Effect of environmental temperature on water evaporation of cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* **2**, 271-272.

Lu CD. 1989. Effects of heat stress on goat production. *Small Ruminnat Research* **2**, 143–150.

Marai IFM, Habeeb AA, Daader AH, Yousef HM. 1995. Effects of Egyptian subtropical summer conditions and the heat-stress alleviation technique of water spray and a diaphoretic on the growth and physiological functions of Friesian calves. *Journal Arid Environments* **30**, 219-225.

Mathers JC, Baber RP, Archibald RF. 1989. Intake, digestion and gastro-intestinal mean retention time in Asiatic Buffaloes and Ayrshire cattle given two contrasting diets and housed at 20 °C and 33 °C. *Journal of Agricultural Science* **113**, 211–222.

三村　耕，山本禎紀，伊藤敏男，住田正彦，荒谷勝弘，藤井宏融．1971．家畜の体感温度に関する研究．日本畜産学会報 **42**，493-500.

三村　耕，森田琢磨．1988．家畜管理学．東京．養賢堂.

Nagasawa T, Hashiguchi N, Onodera R. 1993. Effects of starvation on the plasma NT-methylhistidine concentration in goats. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry* **56**, 533–534.

Nanji AA. 1982. Decreased serum alkaline phosphatase activity in hypothyroidism: possible relationship to low serum zinc and magnesium. *Clinical Chemistry* **28**, 1711-1712.

Nardone A, Lacetera N, Bernabucci U, Ronchi B. 1997. Composition of colostrum from dairy heifers exposed to high air temperatures during late pregnancy and the early postpartum period. *Journal of Dairy Science* **80**, 838-844.

Nationl Research Council (NRC) 1971. A Guide to Environmental Research on Animals. National Academy of sciences, Washington, D. C., p. 77.

Nationl Research Council (NRC) 1981. Effects of Environment on Nutrient Requirements of Domestic Animals. National Academic Press, Washington, D. C., p. 30.

National Research Council (NRC). 1996. Nutrient Requirement of Beef Cattle, Seventh Revised Ed. Washington, D.C.; National Academy Press.

National Research Council (NRC). 2001. Nutrient Requirement of Dairy Cattle, Seventh Revised Ed. Washington, D.C.; National Academy Press.

野田　彰，磯部英彦，鬼頭昭雄，佐藤康雄，杉　正人，西森基貴，松本　淳．2001．気候(過去の気候変化の解析および気候変化の予測)．地球温暖化の日本への影響(環境相地球温暖化問題検討委員会偏)．pp.3-56．環境省地球環境局総務課研究調査室，東京．

農業・食品産業技術総合研究機構編．2007．日本飼養標準　乳牛(2006 年版)．中央畜産会，東京．

Obitsu T, Kamiya, M, Kamiya, Y, Tanaka, M, Sugino, T, Taniguchi, K. 2011. Effects of high ambient temperature on urea-nitrogen recycling in lactating dairy cows. *Animal Science Journal* **82**, 531-536.

小野寺良次．2004．新ルーメンの世界．農文協，東京．

大下友子，久馬　忠，近藤恒夫．1995．乾草給与めん羊の消化管通過速度測定における希土類元素の標識表の比較．日本畜産学会報 **66**，875-881.

Pond KR, Ellis WC, Matis JH, Ferreiro HM, Sutton JD. 1988. Compartment models for estimating attributes of digesta flow in cattle. *British Journal of Nutrition* **60**, 571-595.

Ragsdale AC, Thompson HJ, Worstell DM, Brody S. 1953. Environmetanl physiology and shelter engineering. XXI. The effect of humidity on milk production and composition, feed intakeand water consumption, and body weight in cattle. *Missouri. Agricultural Experiment Station and the United States Depertment of Agriculture Cooperating Research Bulletin* **521**, 3–23.

Ravagnolo O, Misztal I, Hoogenboom G. 2000. Genetic Component of Heat Stress in Dairy Cattle, Development of Heat Index Function. *Journal of Dairy Science* **83**, 2120-2125.

斉藤守，安藤幹男．1986．成長中のラットにおける蛋白質および脂肪蓄積に要する代謝エネルギー量とその利用効率．畜産試験場研究報告 **44**，69-76.

佐々木寛幸．2005．地球温暖化に伴う草地生産・分布の変動予測に関する研究．畜産草地研究所研究報告，5，19-60.

Schneider PL, Beede DK, Wilcox CJ. 1988. Nycterohemeral patterns of acid-base status, mineral concentrations and digestive function of lactating cows in natural or chamber heat stress environments. *Journal of Animal Science* **66**, 112-125.

Segura ET, Roussel JD, Satterlee DG, Gomila LF, Shaffer L, Bergeron JC. 1979. Interaction of exogenous corticotropin and environment on protein bound iodine and other plasma biochemical parameters. *Journal of Dairy Science*. **62**, 278–283.

関根純二郎，森田茂，諸岡敏生，近藤誠司，大久保正彦，朝日田康司．1985．発育中の早期離乳子牛の 4 および 6 ヵ月齢における維持に要する代謝エネルギー量．日本畜産学会報 **56**，920-924.

関根純二郎，森田茂，諸岡敏生，近藤誠司，大久保正彦，朝日田康司．1986．5 カ月齢子牛の絶食後の飼料給与時におけるエネルギー利用効率．日本畜産学会報 **57**，126-130.

Sekine J, Morooka T, Okubo M, Asahida Y. 1987. The estimation of metabolizable energy requirements for maintenance and growth of growing calves weaned at six weeks of age. *Japanese Journal of Zootechnology and Science* **58**, 266-272.

Sejrsen K, Huber JT, Tucker HA, Akers RM. 1982. Influence of nutrition on mammary development in pre- and postpubertal heifers. *Journal of Dairy Science* **65**, 793–800.

Shaffer L, Roussel JD, Koonce KL. 1981. Effects of age, temperature-season, and breed on blood characteristics of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* **64**, 62-70.

Shibata M, Mukai A. 1979. Effects of heat stress and hay-consentrate rations on milk production, heat production and some physiological responses of lactating cows. *Japanese Journal of Zootechnology and Science* **50**, 630–637.

柴田正貴，向居彰夫．1982．濃厚飼料多給時における乾乳牛の熱発生量，各種生理反応に及ぼす環境温度の影響．日本畜産学会報 **53**，33-38.

柴田正貴. 1983. 高温環境下における乳牛の熱収支と乳生産. 日本畜産学会報 **54**, 635-647.

塩谷　繁，寺田文典，岩間裕子．1997．暑熱環境における泌乳牛の生理反応．栄養生理研究会報 **41**，61-68.

Silva LFP, VandeHaar MJ, Whitlock BK, Radcliff RP, Tucker HA. 2002. Relationship between body growth and mammary development in dairy heifers. *Journal of Dairy Science* **85**, 2600–2602.

Statistical Analysis Systems (SAS). 2008. SAS/STAT® User's Guide, Release 9.1.3. edn. SAS Institute Inc., Cary, NC.

杉浦俊彦，横沢正幸．2004．年平均気温の変動から推定したリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響．園芸学会雑誌 **73**，72-78.

Tajima K, Nonaka I, Higuchi K, Takusari N, Kurihara M, Takenaka A, Mitsumori M, Kajikawa H, Aminov RI 2007. Influence of high temperature and humidity on rumen bacterial diversity in Holstein heifers. *Anaerob*e **13**, 57-64.

高田良三，山崎　信，杉浦俊彦，横沢正幸，大塚　誠，村上　斉．2008．地球温暖化が肥育豚の飼養成績に及ぼす影響．―「気候温暖化メッシュデータ(日本)」によるその将来予測―．日本畜産学会報 **79**，59-65.

寺田文典，栗原光規，樋口浩二，Purnomoadi A，永西修．1999．泌乳牛の窒素排泄量に及ぼす高温環境の影響．畜産試験場研究報告 **59**，31-37.

Tedeschi LO, Boin C, Fox DG, Leme PR, Alleoni GF, Lanna DP. 2002. Energy requirement for maintenance and growth of Nellore bulls and steers fed high-forage diets. *Journal of Animal Science* **80**, 1671–1682.

戸田克史，中井文徳，家木　一，藤岡一彦，渡辺裕恭，井内民師，寺田文典．2002．暑熱環境下における体感温度の上昇がホルスタイン種牛の乳量に及ぼす影響．日本畜産学会報 **73**，63-70.

Todini L, Malfattia A, Valbonesia A, Trabalza-Marinuccib M, Debenedettic, A. 2007. Plasma total T3 and T4 concentrations in goats at different physiological stages, as affected by the energy intake. *Small Ruminant Research* **68**, 285-290.

Thom EC. 1959. The discomfort index. *Weatherwise* **12**, 57-59.

Trenberth KE, Jones PD. 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon S, Qin D, Manning M (eds), *Climate Change 2007 The Physical Science Basis.* Working Group I. pp. 235-336. Cambridge university press, New York.

Turnbull GW, Thomas EE. 1987. Evaluation of rare-earth markers using an in vitro ruminal fermentation system and effect of processing method on ruminal turnover of sized corn particles. *Journal of Animal Science* **64**, 1835–1841.

Uyeno Y, Sekiguchi Y, Tajima K, Takenaka A, Kurihara M, Kamagata Y. 2010. An rRNA-based analysis for evaluating the effect of heat stress on the rumen microbial composition of Holstein heifers. *Anaerob*e **16**, 27-33.

Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* **74**, 3583–3597.

Warren WP, Martz FA, Asay KH, Hilderbrand 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.

渡辺裕恭．2001．乳牛の暑熱対策の開始時期を簡便に特定する予測技術の開発．四国農業の新しい技術 **10**，53-57.

Weatherburn MW. 1967. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. *Analytical Chemistry* **39**, 971-974.

West JW. 1999. Nutritional Strategies for managing the heat-stressed dairy cow. *Journal of Animal Science* **77**, Suppl. 21-35.

West JW. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* **86**, 2131-2144.

Wheelock JB, Rhoads RP, Vanbaale MJ, Sanders SR, Baumgard LH. 2010. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science* **93**, 644-655.

White TW, Bunting LD, Sticker LS, Hembry FG, Saxton AM. 1992. Influence of fish meal and supplemental fat on performance of finishing steers exposed to moderate or high ambient temperatures. *Journal of Animal Science* **70**, 3286-3292.

Whitlock BK, VandeHaar MJ, Silva LF, Tucker HA. 2002. Effect of dietary protein on prepubertal mammary development in rapidly growing dairy heifers. *Journal of Dairy Science* **85**, 1516-1525.

Wilson SJ, Kirby CJ, Koenigsfeld AT, Keisler DH, Lucy MC. 1998. Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy cattle. 2. Heifers. *Journal of Dairy Science* **81**, 2132-2138.

山崎　信，村上　斉，中島一喜，阿部啓之，杉浦俊彦，横沢正幸，栗原光規．2006．平均気温の変動から推定したわが国の鶏肉生産に対する地球温暖化の影響．日本畜産学会報 **77**，231-235.

Yokozawa M, Goto S, Hayashi Y, Seino H. 2003. Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan undergradually increasing atmospheric CO2 concentration. *Journal of Agricultual Meteorology* **59**, 117-130.

米村正一郎，矢島正晴，酒井英光，諸隈正裕．1998．CO2 濃度および温度が変化した条件における日本の水稲収量のメッシュ気候値を用いた推定．農業気象 **54**，235-245.

吉澤康和．1989．新しい誤差論　実験データ解析法 p161-168．共立出版，東京．

謝　辞

本研究をとりまとめるにあたり，終始懇切なるご指導を賜りました北海道大学大学院農学研究院 近藤誠司特任教授に深く感謝いたします．学生時代から厳しい言葉と暖かい目で「研究とはなんぞや」を根気よくたたき込んで下さったことは，これまでも，そしてこれからの研究人生を歩む上での糧となるものであります．同 上田宏一郎准教授には学位論文のとりまとめにあたり，わかりやすく懇切丁寧にご指導賜り深く感謝いたします．また，同 高橋昌志教授および北方生物研フィールド科学センター 三谷朋弘助教には，ご校閲の労をおとりいただき，有益なる助言を賜り，ここに深く感謝いたします．

本研究は農研機構畜産草地研究所において実施したものであり，研究を遂行するにあたり，多岐にわたりご指導賜りました元 農研機構畜産草地研究所 寺田文典氏ならびに栗原光規氏(現 農業資源生物研究所)には深く感謝しております．日頃の議論を通じて幅広い知識や深い示唆をいただき，また，目先の結果にとらわれず，真実を追究する姿勢から多くを学びました．農研機構畜産草地研究所 永西修氏，田鎖直澄氏，樋口浩二氏，鈴木知之氏には，動物実験でともに汗を流し，疑問や思いつきを気軽に話し合う中で，非常に有益なご助言を賜り，深く感謝しております．同 柾木茂彦氏，大谷文博氏，鎌田八郎氏，田中正仁氏には，研究遂行上のご理解，ご支援と温かい励ましをいただき，深く感謝しております．同 業務第１科・鈴木伸明氏，斉藤幸生氏，鈴木茂雄氏，我妻信昭氏，伊藤眞氏，井上和明氏，入江衛氏，長谷川裕一氏，土田利夫氏，久留直樹氏，池田新一氏，久留広樹氏，日辻雅信氏，熊田和行氏，宮崎洋幸氏，山内直人氏，稲葉政則氏，荻津勝氏，結城勝弘氏，土田晃司氏，梶谷健二氏，青木功氏，大久保公規氏，相ノ谷和宏氏，仁礼格氏，高橋智史氏，那須勇人氏には，試験牛の管理，飼料調製，過酷な暑熱環境での朝夕問わずの試料採取，作業効率向上や労力軽減のためのアイディア等多くのご支援ご協力を賜り，深く感謝しております．飼料分析にあたり，島田知子氏ならびに韮澤恵美子氏には迅速かつ正確な対応で，子育ての先輩としてもいつも笑顔で励ましていただきましたことを深く感謝いたします．代謝実験棟を維持管理していただいた浜田設備の皆様にも心より感謝しております．

最後に，これまで長年にわたり，温かく見守り，そして辛抱強く応援してくれた家族に感謝の意を表して謝辞といたします．