

代謝実験棟におけるガス流路制御ユニットおよび データ収集ユニットの設計

鈴木知之¹⁾・神谷裕子・神谷 充・田中正仁

(2011年6月14日 受理)

要 旨

鈴木知之・神谷裕子・神谷 充・田中正仁 (2012) 代謝実験棟におけるガス流路制御ユニットおよびデータ収集ユニットの設計。九州沖縄農研報告 57:1-20.

九州沖縄農業研究センター代謝実験棟には、大家畜用開放型呼吸試験チャンバー、ガス分析装置およびデータ収集ユニットから成る代謝実験システムが構築されており、同時に4頭のガス代謝量を連続的かつ個別に測定することができる。これまで本システムを用いて、暑熱環境下におけるウシのエネルギー代謝量や暖地産飼料の栄養価に関するデータが収集されてきた。著者らは代謝実験システムのうち、ガス分析装置に付随するサンプルガス流路制御ユニットおよびデータ収集ユニットのハードウェアを汎用品で更新し、Microsoft Visual Basic 2008を用いてプログラムの作成を行うとともに、急速応答法による単位時間当たりガス代謝量の測定を可能にした。更新されたシステムで二酸化炭素回収試験を行った結果、4基の大家畜用チャンバーにおける回収率は97.5から101.3%の範囲にあり、平均回収率は98.8%であった。次に、ホルスタイン種泌乳牛4頭を用いた呼吸試験を行ったところ、急速応答法による1分毎のガス代謝量演算結果は乳牛の咀嚼活動や姿勢の変化に鋭敏に対応しており、また、1日のガス代謝量は飼料摂取量および乳生産量と対応していた。以上の結果から、更新したシステムでも高い精度で呼吸試験を行うことが可能であり、急速応答法を用いた演算により、今後のエネルギー代謝研究の精密化に対応した試験を行うことが可能である。

キーワード：ウシ、エネルギー代謝、急速応答法、呼吸試験。

I. 緒 言

九州沖縄農業研究センターの代謝実験棟は1978年に設置され(向居ら, 1989), 1994年にはチャンバー、空調およびデータ収集システムの改修が行われ現在に至っている。本実験棟の特徴は、温湿度自動制御下において大家畜4頭の酸素(O₂)、二酸化炭素(CO₂)およびメタン(CH₄)ガス代謝量を個別かつ同時に測定できる点にあり、開放型呼吸試験チャンバー、ガス分析装置およびデータ収集ユニットから成る代謝実験システムがこれを可能にしている。本装置はこれまで、西南暖地におけるウシのエネルギー代謝、および飼料のエネルギー価の評価に利用されてきており、これらのデータは日本飼養標準乳牛(農業・食品産業技術総合研究機構, 2007)および日本標準飼料成分表(農業・食品産業技術総合研究機構, 2010)に活用されているところである。また、CH₄ガス測定結果

を用いることにより、温室効果ガスであるCH₄のウシからの発生量評価や抑制技術の開発が、本施設において行われてきた。

1994年に更新されたガス分析計に付随するサンプルガス流路切り替えユニットおよびデータ収集ユニットはともに、プログラム可能なI/Oコントローラーモジュールおよび各種デバイスモジュールより成り、データ収集ユニットについてはさらに、UNIXベースのワークステーションで試験の管理、データ記録および代謝演算を行う安定性の高いシステムであった。しかし、設置から16年以上経ち、収集データの記憶容量、外部への出力方法に不都合が生じており、また、部品の交換も不自由している状態であった。近年のパーソナルコンピューター(PC)、計測制御・通信デバイス、および各種センサーの発達は著しく、またソフトウェア開発環境も格段に向上しており、畜産草地研究所ではこれらを用いて、代謝実験棟における

データ収集システムの更新を行っている(樋口ら, 2010)。

ウシの熱発生メカニズムの解明には、これまでの1日の総熱発生量だけでなく、行動や生理状態と関連する熱発生量の日内変動を測定する必要がある。大家畜用チャンバーの場合、ガス拡散容積が大きいので、単位時間当たりのガス濃度測定値は平均化された値になってしまうが、これを克服するためMcLEAN and WATTS (1976) は、大家畜用チャンバーにおける瞬時の熱発生量の変動を測定する演算方法(急速応答法)を提案している。本方法を用いれば、演算プログラムの改変のみで、家畜の行動や生理状態の変化に即応した単位時間当たりの熱発生量を得ることができる。

著者らは、九州沖縄農業研究センター代謝実験棟の代謝実験システムを構成する装置のうち、ガス分析計サンプルガス切り替えユニットおよびデータ収集ユニットについてハードウェアを更新し、これらの制御プログラムを作成し、さらに、急速応答法によるガス代謝量演算を可能にした。ここでは、更新された代謝実験システムを紹

介するとともに、新システムによる測定精度の検討、およびウシを用いた検証を行ったので報告する。

本研究を遂行するに当たり、研究支援センター業務第一科乳牛班、日高昭則班長はじめ班員諸氏には代謝実験中の飼養管理および施設の改良・補修において多大な支援を頂いた。北海道農業研究センター田鎖直澄主任研究員には二酸化炭素回収試験について、また、畜産草地研究所樋口浩二主任研究員にはシーケンサー設置に関するご指導を頂いた。さらに、畜産草地研究所寺田文典企画管理部長には本報告の校閲を頂いた。ここに記して、以上の方々に感謝の意を表す。

II. 代謝実験システム

1. 施設の概要

代謝実験棟は2つの実験室を持ち、各室2基、計4基の大家畜用呼吸試験チャンバーが設置されており、同時に4頭を個別に測定することが可能である。各チャンバー内にはスタンション、ゴムマット、飼槽、および飲水器が設置され、採食、飲水、立

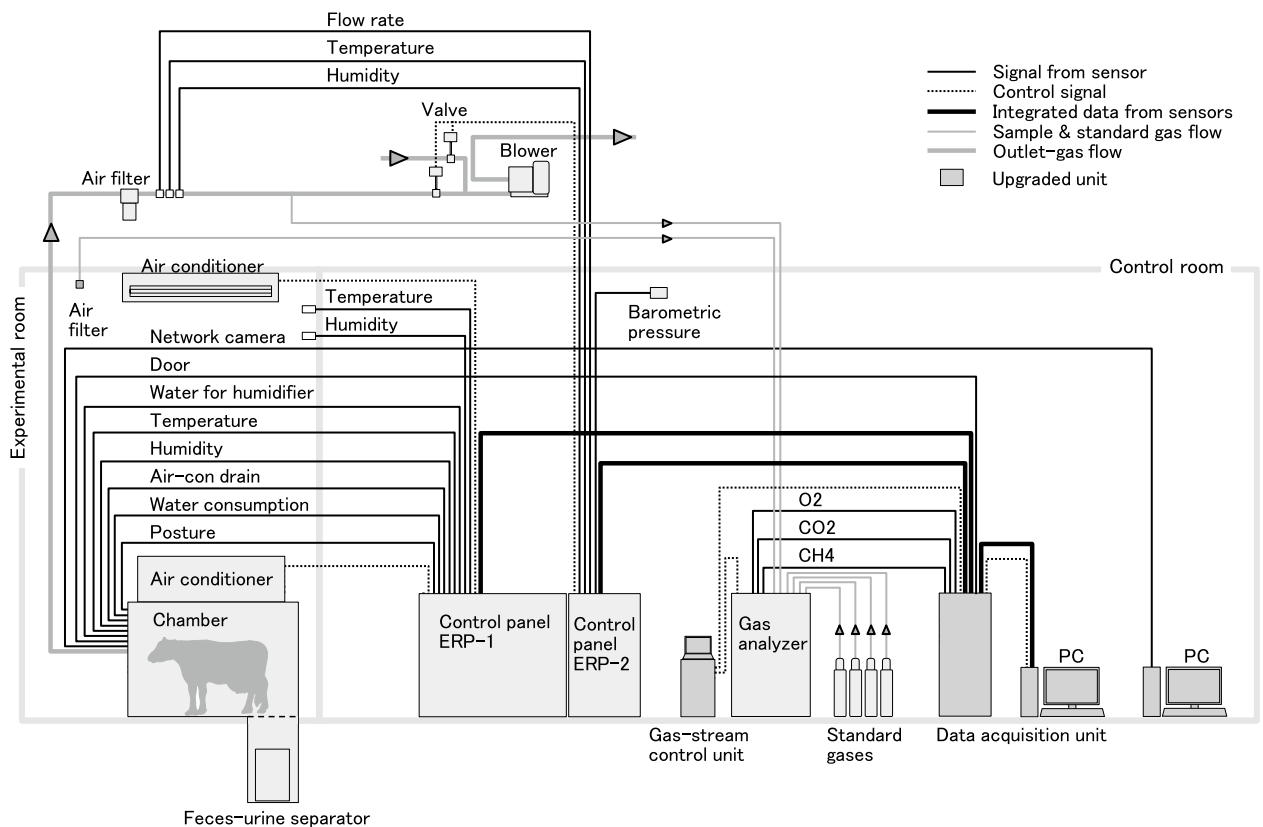


Fig. 1 Schematic diagram of data acquisition and control of one chamber during respiration trial

位・横臥の姿勢変更をウシは自由に行うことができる。また、チャンバー内には搾乳室と搾乳機用真空ポンプが設置されており、搾乳によるチャンバー内ガス濃度の変動が最小限になるよう設計されている。牛床後端には糞尿の落下口が開口しており、落下した糞尿は気密された地下チャンバー内の自動分離機において糞と尿に分離され、それぞれステンレス製の缶に回収される。

一つのチャンバーにおける代謝実験データの収集および制御の概念を第1図に示した。各実験室およびチャンバーの温湿度、各チャンバーの流量制御は制御盤（EPR-1およびEPR-2）で行う。温湿度はAおよびB室でそれぞれ独立した制御が可能であり、制御範囲は温度10-40℃、相対湿度40-80%である。温湿度は定値での設定（SDC40, 山武, 東京）の他、プログラムによる動的な設定（プログラム調節計DCP550, 山武）が可能である。照明も明期と暗期の設定が可能である。各チャンバーの通気量は調節計（SDC40, 山武）で設定し、通気弁の開閉によって通気量が自動調節される。

経時的に収集されるデータは、各チャンバーにおけるドアの開閉状態（磁気形近接センサー, GLS, オムロン, 京都）、温湿度（RHS302, 山武）、空調排水量（転倒ます型雨量計感部, 佐藤計量器製作所, 東京）、加湿水量（流量計RH, 日東精工, 京都）、飲用水供給量（流量計, RS, 日東精工）、ウシの姿勢（光電センサー, E3S-CD12, オムロン）、チャンバー排出ガスの流量（EJ110形差圧伝送器, 横河電機, 東京）および温湿度（RHS302, 山武）、各実験室の温湿度（RHS302, 山武）、および大気圧（アネロイド型気圧計, 横河電機）である。これらのデータは最終的にデータ収集ユニットに送られ、PCに蓄積される。ネットワークカメラ（BB-HCM311, パナソニック, 大阪）によるウシの行動観察も可能であり、画像データは録画ソフトウェア（BB-HNP11, パナソニック）によりPCに蓄積される。所内LANを利用しているため、研究室から、あるいはさらにVPN接続により所外からリアルタイムで画像を閲覧することができる。通気量異常低下および停電といった異常時にはチャンバーの緊急解放弁が開口する。

ガス分析装置は、サンプルガス吸引ポンプ（APN-P085VX, イワキ, 東京）、電子冷却除湿器（堀場製

作所, 京都）、O₂（4100, Servomex, Crowborough, UK）、CO₂（VIA510, 堀場製作所）およびCH₄測定装置（VIA510, 堀場製作所）からなり、2基設置されている。通常は1基のガス分析装置で2基の呼吸試験チャンバーおよび1つの実験室のガス濃度を測定する。流路の切り替え間隔、順序はデータ収集ユニットのPCからの制御が可能であるが、ガス分析計の反応特性から、通常は切り替え間隔90秒、データ収集期間30秒で測定を行っている。得られたガス濃度および流路のデータはデータ収集ユニットに送られPCに蓄積される。

2. 新設ユニットの詳細

ガス分析計に付随する今回新設したガス流路制御ユニットは、ガス分析計の制御パネル、あるいはデータ収集ユニットからの信号を判断し、ガス分析装置内のサンプルガス流路の電磁弁を制御することにより、流路の切り替えを行う。流路切り替えユニットはI/Oコントローラーモジュールとこれに接続する各種デバイスモジュール（コンテック, 大阪; 第1表）、およびPC（OS: Microsoft Windows XP）から成る（第2図および写真1）。流路切り替えプログラムはI/Oコントローラーモジュール用Win32API（DLL）形式のドライバライブラリ（コンテック）を利用したMicrosoft Visual Basic 2008で記述されており、プログラムの実行にはAPI-CAP（W32）（コンテック）およびMicrosoft .NET Framework 3.0を事前にインストールしておく必要がある。プログラムを起動し、プログラムからI/Oコントローラーとデバイスモジュールを起動、続いて制御を開始することにより、サンプルガス流路の切り替えが可能になる。プログラム起動中は入出力信号状態がPCのモニター上に表示される（第3図）。

新設されたデータ収集ユニットは流路切り替えユニットと同様、I/Oコントローラーモジュールとこれに接続する各種デバイスモジュールおよびPCから成る（第2図および写真2）。データ収集プログラムの記述言語および実行環境は、流路切り替えユニットのプログラムと同様である。プログラムを起動したら、最初に起動画面でのI/Oコントローラーとデバイスモジュールの起動、「ガス分析計校正」画面でのガス分析計2点校正、「ガス分析

Table 1 Specifications of I/O controller unit and device modules¹⁾

	Product code	Output/input voltage	output/input current	No. of channel
I/O controller unit	CPU-CA20(FIT)GY	–	–	–
Digital output module	DO-16(FIT)GY	12-48 VDC	150mA (12-24V) /50mA (36-48V)	16
Digital output module	DO-32(FIT)GY	12-48 VDC	150mA (12-24V) /50mA (36-48V)	32
Digital output module	RRY-4(FIT)GY	Max. 125 VAC, 30 VDC	2A	4
Digital input module	DI-32(FIT)GY	12-24 VDC	4mA (12V) /8mA (24V)	32
Digital input module	DI-16(FIT)GY	12-24 VDC	4mA (12V) /8mA (24V)	16
Analog input module	ADI2-8(FIT)GY	0-5 VAC/DC	–	8
Counter module	CNT16-8(FIT)GY	5 VDC	4mA	8

¹⁾All products manufactured by CONTEC (Osaka, Japan).

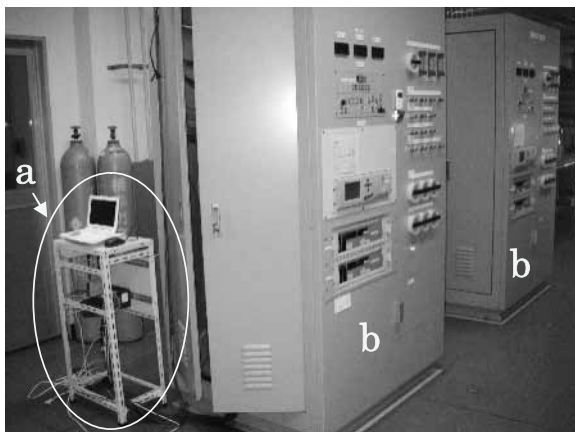


Photo 1 Gas-stream control unit (a) and gas analyzers (b)

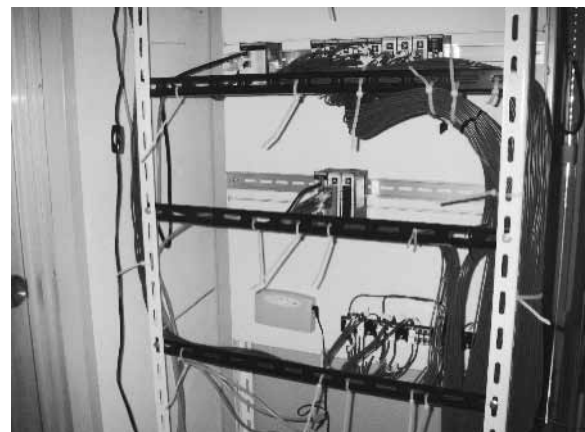


Photo 2 I/O controllers and device modules in data acquisition unit

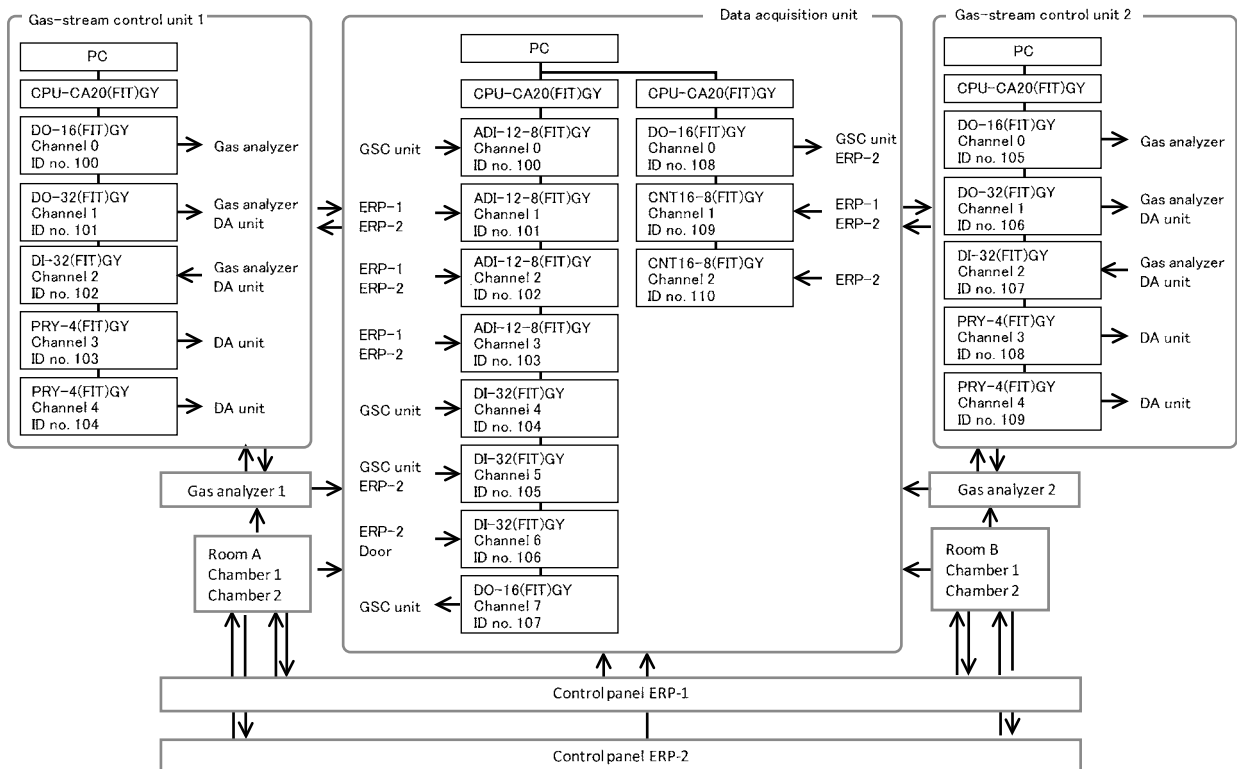


Fig. 2 Relationship and dataflow among device modules, gas-stream control (GSC) unit and data acquisition (DA) unit, gas analyzers, and sensors in experimental rooms and chambers



Fig. 3 Screen of gas-stream control program for unit 1

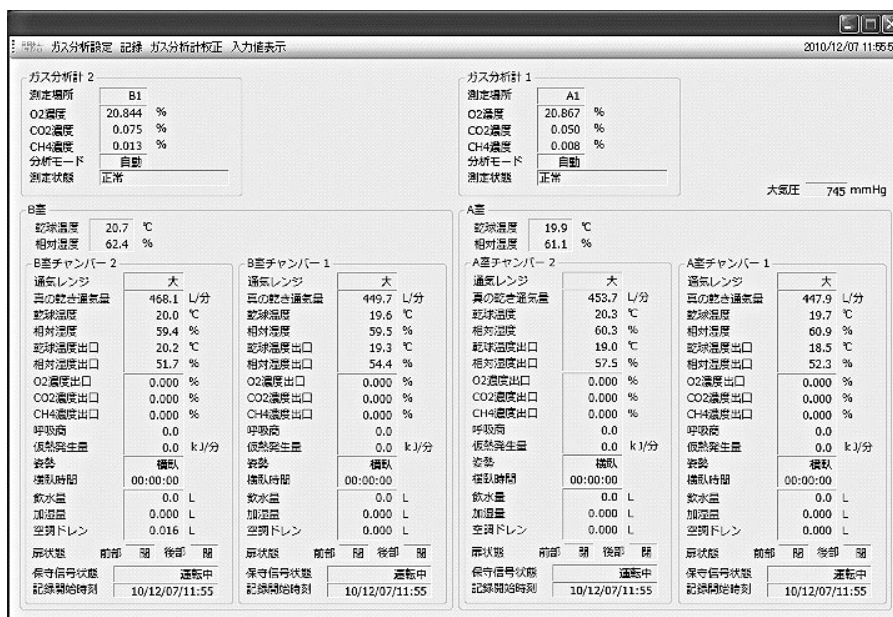


Fig. 4 Main screen of data acquisition program

設定」画面での各ガス分析計におけるサンプルガス流路設定を順次行い、メイン画面で測定を開始する(第4図)。校正結果はCSV形式ファイルで保存され、校正を行わずに測定を開始する場合、直近の校正結果をもとに検量線が作成される。試験開始時には「試験データ記録」画面において実験データーを記録するチャンバーの選択を行う。試験中は各チャンバーの温湿度、ガス濃度、ウシの姿勢、ガス代謝量等が表示され、入力値表示画面では1秒毎に更新される入出力信号を確認することができる。時系列データーはガス濃度とこれ以外の測定項目の2つのCSV形式ファイルとして保存される。試験終了後、2つのファイルをMicrosoft Excel等を用いて結合し、Microsoft Visual Basic 2008で記述されたガス代謝演算プログラムで、急速応答法を用いた1分毎のガス代謝量の演算を行う。演算結果出力ファイルには1分毎の熱発生量(BROUWER, 1965)の演算結果が含まれるが、尿中窒素排泄の補正は行われていない。

急速応答法は排気量に対してチャンバー容積が大きい場合に有効とされる算出方法であり、チャンバー内ガス容積変化量と入排気ガス容積差の和で求められる。以下に1分間の家畜によるO₂消費量算出式を示す。

$$V_{O_2} = (V_N \frac{dC_{outO_2}}{dt} + F_{in}C_{inO_2} - F_{out}C_{outO_2}) / 100$$

ここで、

t: 時刻 (分)

V_{O₂}: O₂消費量 (L/分)

V_N: チャンバー有効拡散容積 (L)

F_{in}: チャンバー入気ガス通気量 (L/分)

F_{out}: チャンバー排気ガス通気量 (L/分)

C_{inO₂}: チャンバー入気(実験室)ガス中O₂濃度 (%)

C_{outO₂}: チャンバー排気ガス中O₂濃度 (%)

尚、本報告における体積の表記はすべて標準状態(STP)とする。

式中のF_{in}については、窒素の入気量と排気量が等しいものとして、以下の式で求める。

$$F_{in} = \frac{100 - (C_{outO_2} + C_{outCO_2} + C_{outCH_4})}{100 - (C_{inO_2} + C_{inCO_2} + C_{inCH_4})} F_{out}$$

ここで、

C_{inCO₂}, C_{inCH₄}: チャンバー入気(実験室)ガス中CO₂およびCH₄濃度 (%)

C_{outCO₂}, C_{outCH₄}: チャンバー排気ガス中CO₂およびCH₄濃度 (%)

家畜からのCO₂発生量(V_{CO₂}, L)とCH₄発生量の算出式は同じであり、以下にCO₂発生量算出式を示す。

$$V_{CO_2} = (V_N \frac{dC_{outCO_2}}{dt} + F_{out}C_{outCO_2} - F_{in}C_{inCO_2}) / 100$$

III. 代謝実験システムの精度検証と実際の測定

システムの健全性を確認するためにCO₂回収試験を各チャンバーで2回行った。回収試験時のチャンバー内温湿度は20℃, 60%とし、約200gのCO₂(99.99%)を約5分間で注入した。注入時の分析ガス流路の切り替えはチャンバー90秒および実験室90秒の反復とし、測定時間は注入開始から4時間とした。空ボンベおよびレギュレーターの合計重量は約8 kgであり、最小読み取り0.1 gの電子天秤(PC16, METTLER, Zürich, Switzerland)で注入前後のボンベ重量を測定し、CO₂実注入量を求めた。このCO₂実注入量と、チャンバー内ガス濃度測定結果から算出されたCO₂回収量からCO₂回収率を算出した。

試験の結果、すべての回収試験を通してCO₂回収率は97.5から101.3%の範囲にあり、平均回収率は98.8%であった(第2表)。CO₂注入開始からCO₂回収率90%に到達するまでの時間は平均で99分であり、チャンバー間差および測定間差は非常に小さかった。代謝実験棟が新設された際のCO₂回収率は、設定ガス流量が450 L/分の時、チャンバー4基の平均で95%である(栗原ら, 1989)。他機関のCO₂回収率またはエタノール燃焼試験によるO₂あるいはCO₂回収率は、畜産草地研究所の大家畜用チャンバーで平均101.5%(岩崎ら, 1982), Roman L. Hruska U.S. Meat Animal Research Centerの中家畜用チャンバーで98.0から103.5%(NIENABER and MADDY, 1985), Research Institute for Biology of Farm Animals, Research Unit Nutritional Physiology "Oskar Kellner"の大家畜用チャンバーで平均99.9%(DERNO et al., 2009)であり、当研究センターの呼吸試験システムはこれらのシステムと同程度の精度で測定が可能であると考えられた。

CO₂回収率が100%と見なせる場合、CO₂注入量

は、時刻 t (CO₂注入開始からの経過時間, 分) までのチャンバーから排気された積算CO₂量と、このときチャンバー内に残存しているCO₂量の和で表わされ、次式が成立する。

$$V_{CO_2} = (V_N C_{dCO_2}(t) + \sum F_{out}(t) C_{dCO_2}(t)) / 100$$

ここで、

V_{CO_2} : CO₂注入量 (L)

V_N : チャンバー有効拡散容積 (L)

$C_{dCO_2}(t)$: 時刻 t におけるチャンバー入気および排気ガス中CO₂の濃度差 (%)

$F_{out}(t)$: 時刻 t における排気ガスの通気量 (L/分)

本式を用いて各チャンバーの有効拡散容積を求めた結果を第2表に示した。有効拡散容積の平均値は14,244 Lであり、チャンバー間差が認められるが、同一チャンバーでの測定間差は83から154 Lであり、この差は平均値の1.1%以下であった。以上の検討から、今回設置したデータ収集ユニットによる測定精度は十分なものと考えられた。

ウシを導入した場合の本システムの測定特性を確認するために、4基のチャンバーにホルスタイン種泌乳牛4頭 (平均体重, 646 kg) をそれぞれ係留し、扉を開けた状態で9日間馴致し、10日目に呼吸試験を行った。設定温湿度は20℃, 60%とした。供試牛にはイタリアンライグラスサイレージと市販配合飼料を乾物ベース7:3で混合したTMR (乾物当たりTDN, 70%; CP, 16%) を飽食給与し、水およびミネラルブロックは自由摂取とした。呼吸試験は10:30から翌10:00までの23.5時間行い、この間、飼料給与を10:30, 14:30および18:30, 搾乳を18:00および翌8:30に行った。なお、本試験は九州沖縄農業研究センター動物実験要領に基づいて設置された動物実験委員会の承認の下に行われた。測

定例として、A室チャンバー1における1日の測定結果を第5図に示した。O₂, CO₂およびCH₄ガス代謝量測定値は入排気ガス容積差から求めた通常測定値よりも急速応答法による測定値の方が鋭敏に反応していた。

ガス消費量算出値とウシの行動あるいはチャンバーの状況との関係を検討するために、A室チャンバー1の1分毎データを10分毎に集計し、従属変数を10分当たりO₂消費量 (Y, L), 独立変数を10分当たりの扉開閉回数 (X₁, 回), 採食時間 (X₂, 分), 反すう時間 (X₃, 分), 塩舐めや毛づくろい等の時間 (X₄, 分), 佇立時間 (X₅, 分), 起立あるいは横臥にともなう姿勢変化回数 (X₆, 回) とした、以下の重回帰モデルを作成した。

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + eX_5 + fX_6 + g$$

ここで、 a (L/回), b (L/min), c (L/min), d (L/min), e (L/min) および f (L/回) は係数とし、 g (L/10分) は切片とする。

10分毎に集計した、急速応答法によるO₂消費量算出値と通常の入排気ガス容積差から求めたO₂消費量算出値をそれぞれモデル式に当てはめ、重回帰分析を行った。その結果、急速応答法で求めたO₂消費量を用いた重回帰式の方が、通常の方法で求めたO₂消費量を用いた重回帰式よりも補正決定係数が高かった (0.74 vs. 0.15; 第3表)。また、急速応答法では重回帰式中のすべての係数が有意であったのに対し、通常の方法では有意な係数はドアの開閉、反すうおよび切片のみであった。これらの結果は、急速応答法の方が入排気ガス容積差による通常算出方法よりも、ウシのガス代謝量と行動あるいはチャンバーの状況がよく一致することを示す。これらの結果から、急速応答法によ

Table 2 Infusion of chemically pure CO₂ (99.99%), CO₂ recovery rate, and net volume of the respiration chambers

		Room A				Room B			
		Chamber 1		Chamber 2		Chamber 1		Chamber 2	
		1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Outlet-gas flow	L/min	458.1	458.5	467.7	465.3	459.6	459.7	459.3	459.5
CO ₂ introduced, a	g	206.8	222.5	202.4	213.4	208.6	206.0	206.5	205.8
CO ₂ recovered, b	g	205.5	225.4	198.9	206.2	207.1	200.9	206.3	202.4
CO ₂ recovery, b/a×100	%	99.4	101.3	98.3	96.6	99.3	97.5	99.9	98.3
90% response time	min	100	100	96	96	100	99	99	100
Net volume of chamber	L	14150	14067	14594	14490	14389	14543	13804	13913

るガス代謝量の解析は、大家畜用チャンバーにおける、ウシの行動あるいは生理現象とエネルギー代謝との関係を解明する上で有用な手法であると考えられた。

1日の呼吸試験結果を第4表に示した。ウシからの1日当たりCH₄発生量は乾物摂取量に比例するが (SHIBATA et al., 1993), 本試験でも乾物摂取量が

高いウシほど1日当たりCH₄発生量が高かった。畜産草地研究所代謝実験棟で得られたホルスタイン種泌乳牛の乾物摂取量当たりCH₄発生量は平均で27.2 L/kgであることが報告されているが (SHIBATA et al., 1993), 本試験結果もこれに近い値であった。また、乾物摂取量が高いウシほど代謝体重当たり熱発生量は高かった。

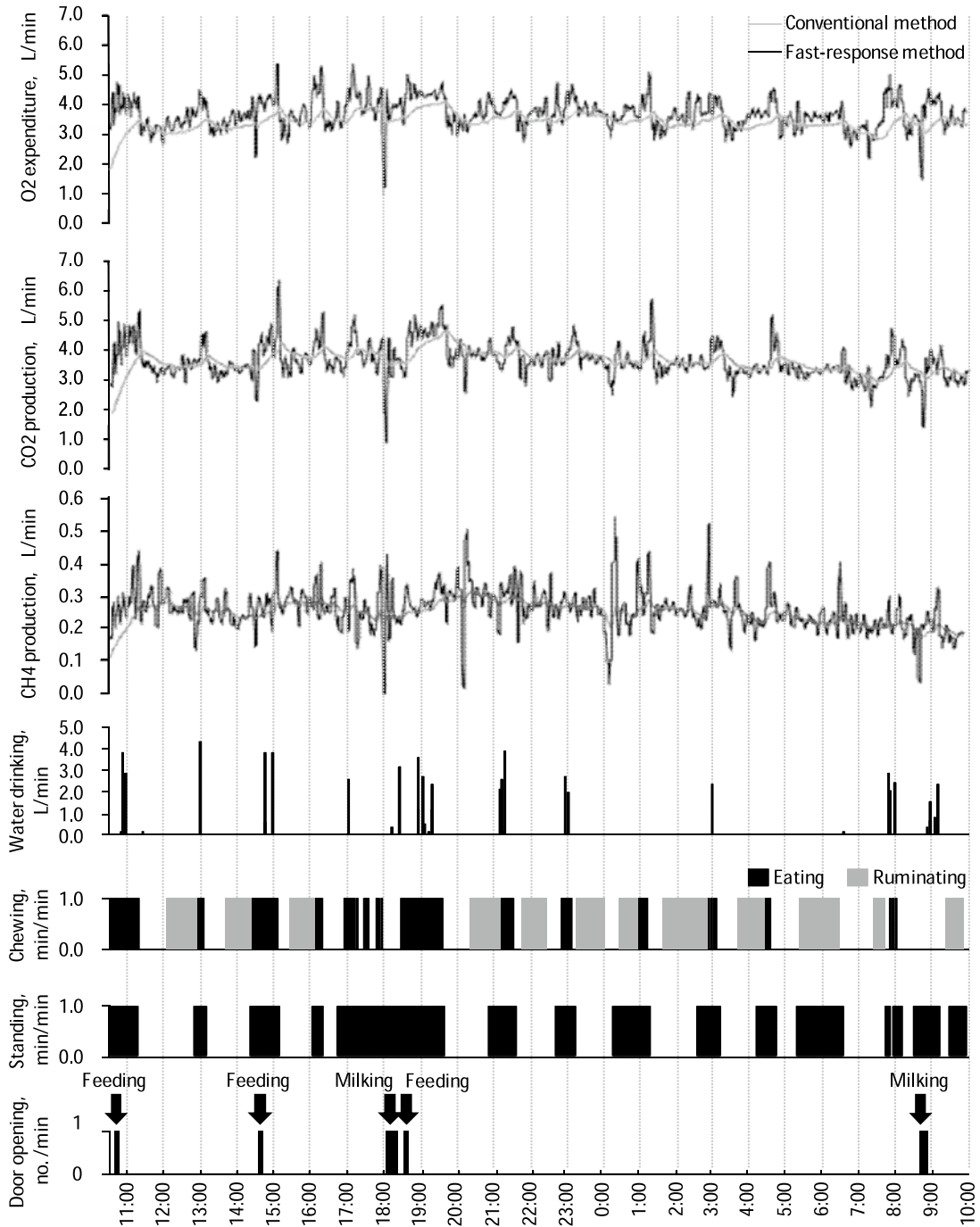


Fig. 5 Typical diurnal changes of O₂ expenditure, CO₂ and CH₄ production determined by using conventional or fast-response method (McCLEAN and WATTS, 1976), and water intake, chewing activities, posture, and door opening

以上の結果から、九州沖縄農業研究センター代謝実験棟において今回更新した、ガス分析計ガス流路切り替えユニットおよびデータ収集ユニットを用いた代謝実験システムにより、高い精度でガス代謝量の測定を行えることが示された。また、急速応答法を採用したことにより、ウシの行動等に鋭敏に反応したガス代謝量の演算結果を得られることが示された。更新したユニットでは、汎

用品のシーケンサーおよびプログラミング言語を用いているため、今後の新たな機器の設置等の改造にも柔軟に対応できる。代謝実験棟が建設されてから30年以上が経過しているが、今後も適切なメンテナンスを行うことにより、これまでのエネルギー要求量や飼料のエネルギー価の測定に加え、今後のエネルギー代謝研究の精密化に対応した試験を行うことが可能である。

Table 3 Factors in liner multiple regression model¹⁾ contributed to O₂ consumption (Y, L/10min) determined by using conventional or fast-response method

Factor		Conventional method ²⁾				Fast-response method ³⁾			
		Estimated coefficient	SE	t	P	Estimated coefficient	SE	t	P
Door opening, a	L/no.	-2.70	0.75	-3.61	0.00	-3.22	0.62	-5.22	0.00
Eating, b	L/min	0.00	0.09	0.03	0.97	0.80	0.08	10.29	0.00
Rumination, c	L/min	-0.14	0.06	-2.21	0.03	0.31	0.05	6.03	0.00
Chewing excepting eating and rumination ⁴⁾ , d	L/min	0.09	0.15	0.58	0.56	0.48	0.12	3.88	0.00
Standing, e	L/min	0.09	0.07	1.30	0.19	0.18	0.06	3.22	0.00
Position change, f	L/no.	0.10	0.55	0.18	0.86	3.16	0.46	6.93	0.00
Intercept, g	L/10min	35.83	0.45	78.81	0.00	31.49	0.38	83.90	0.00

¹⁾ Y (L/10 min) = aX_1 (no./ 10min) + bX_2 (min/ 10min) + cX_3 (min/ 10min) + dX_4 (min/ 10min) + eX_5 (min/ 10min) + fX_6 (no./ 10min) + g , where X_{1-6} were independent variables, a-f were coefficients, and g was intercept. Values from cow 1 were put into Y and X_{1-6} .

²⁾ Model equipped O₂ consumption determined by using conventional method (df=140, adjusted R²=0.15, P<0.001).

³⁾ Model equipped O₂ consumption determined by using fast-response method (df=140, adjusted R²=0.74, P<0.001).

⁴⁾ Chewing activity associated with grooming, salt licking or water intake.

Table 4 Body weight, feed intake, milk yield, gaseous metabolism, and duration of activities in lactating Holstein cows

		Room A		Room B	
		Chamber 1	Chamber 2	Chamber 1	Chamber 2
		Cow 1	Cow 2	Cow 3	Cow 4
Body weight	kg	693.3	635.0	684.3	572.0
Dry matter intake	kg/day	12.4	16.6	9.5	15.1
Water intake	L/day	66.9	72.8	33.5	64.1
Milk yield	L/day	21.5	22.0	13.1	25.4
O ₂ expenditure	L/day	5223	5150	4575	4678
CO ₂ production	L/day	5343	5588	4492	5014
CH ₄ production	L/day	368	441	286	395
	L/kgDMI	29.6	26.5	30.0	26.2
RQ		1.02	1.08	0.98	1.07
Heat production	kJ/kgMBW ¹⁾ /day	812	865	712	848
Duration of activities					
Standing	min	667	841	835	702
Eating	min	289	338	261	497
Ruminating	min	497	631	332	511

¹⁾ Metabolic body weight.

引用文献

- 1) BROUWER, E. (1965) Report of sub-committee on constants and factors. p.441-443. in *Energy Metabolism of Farm Animals*, Academic Press, London, UK.
- 2) DERNO M., ELSNER, H. G., PAETOW, E. A., SCHOLZE, H. and SCHWEIGEL, M. (2009) Technical note: A new facility for continuous respiration measurements in lactating cows. *J. Dairy Sci.* **92** : 2804-2808.
- 3) 樋口浩二・小林洋介・野中最子・永西修 (2010) 畜産草地研究所大中家畜代謝実験棟における新データ収集処理装置の設計. 畜産草地研究所研究報告 **10** : 15-27.
- 4) 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 - とくに呼吸試験装置の機能を中心として -. 畜産試験場研究報告 **39** : 41-73.
- 5) 栗原光規・向居彰夫・柴田正貴 (1989) 高温時における乳牛のエネルギー代謝 2. 開放式呼吸試験装置の性能検定. 九州農業試験場報告 **29** : 71-88.
- 6) MCLEAN, J. A., and WATTS, P. R. (1976) Analytical refinements in animal calorimetry. *J. Applied Physiology* **40** : 827-831.
- 7) 向居彰夫・柴田正貴・栗原光規 (1989) 高温時における乳牛のエネルギー代謝 1. 九州農業試験場に設置した代謝実験室の装備と機能の概要. 九州農業試験場報告 **29** : 27-69.
- 8) NIENABER, J. A., and MADDY, A. L. (1985) Temperature controlled multiple chamber indirect calorimeter-design and operation. *TRANSACTIONS OF THE ASAE* **28** : 555-560.
- 9) 農業・食品産業技術総合研究機構 (2007) 日本飼養標準乳牛 (2006年版). 中央畜産会, 東京.
- 10) 農業・食品産業技術総合研究機構 (2010) 日本標準飼料成分表 (2009年版). 中央畜産会, 東京.
- 11) SHIBATA, M., TERADA, F., KURIHARA, M., NISHIDA, T., and IWASAKI, K. (1993) Estimation of methane production in ruminants. *Anim. Sci. Technology (Jpn.)* **64** : 790-796.

補 遺

資料 1 ガス分析計流路制御ユニットのデバイスモジュール割り付け表

I/O コントローラー No.	チャンネル No.	デバイス型式	割付名	ID	信号種	接点 No.	信号名称						
1	0	DO-16(FIT)GY	DIO080100	100	デジタル出力	0	電磁弁 ストリーム 01						
						1	電磁弁 ストリーム 02						
						2	電磁弁 ストリーム 03						
						3	電磁弁 ストリーム 04						
						4	電磁弁 ストリーム 05						
						5	電磁弁 ストリーム 06						
						0	電磁弁 校正						
						1	電磁弁 サブ ゼロ						
						2	電磁弁 サブ スパン						
						3	電磁弁 メイン ゼロ						
						4	電磁弁 メイン スパン						
						1	1	DO-32(FIT)GY	DIO080101	101	デジタル出力	0	ガス分析計および DAU ¹⁾ 自動
												1	ガス分析計および DAU 手動
												2	ガス分析計および DAU ストリーム 01
3	ガス分析計および DAU ストリーム 02												
4	ガス分析計および DAU ストリーム 03												
5	ガス分析計および DAU ストリーム 04												
6	ガス分析計および DAU ストリーム 05												
7	ガス分析計および DAU ストリーム 06												
10	ガス分析計および DAU O ₂ レンジメイン												
11	ガス分析計および DAU O ₂ レンジサブ												
20	ガス分析計 校正中												
21	ガス分析計 メイン ゼロ												
22	ガス分析計 メイン スパン												
23	ガス分析計 サブ ゼロ												
24	ガス分析計 サブ スパン												
25	DAU 自動校正												
26	DAU 自動チェック												
27	DAU サンプリング異常												
1	2	DI-32(FIT)GY	DIO080102	102	デジタル入力	0	DAU ストリーム 01						
						1	DAU ストリーム 02						
						2	DAU ストリーム 03						
						3	DAU ストリーム 04						
						4	DAU ストリーム 05						
						5	DAU ストリーム 06						
						6	ガス分析計 校正中						
						7	ガス分析計パルス メイン ゼロ						
						10	ガス分析計パルス メイン スパン						
						11	ガス分析計パルス サブ ゼロ						
						12	ガス分析計パルス サブ スパン						
						13	流量センサ サンプリング異常						

資料 1 つづき

I/O ラー No.	コント ロ ル No.	チャン ネル No.	デバイス 型式	割付 名	ID	信号 種	接点 No.	信号 名称
1	2		DI-32(FIT)GY	DIO080102	102	デジタル入力	14	DAU 校正選択
							15	DAU サブゼロ選択
							16	DAU サブスパン選択
							17	DAU 校正読取完了
							20	ガス分析計 自動
							21	ガス分析計 手動
							22	ガス分析計 ストリーム 1
							23	ガス分析計 ストリーム 2
							24	ガス分析計 ストリーム 3
							25	ガス分析計 ストリーム 4
							26	ガス分析計 ストリーム 5
							27	ガス分析計 ストリーム 6
							30	ガス分析計 保守中
							31	ガス分析計 O ₂ レンジ メイン
							32	ガス分析計 O ₂ レンジ サブ
							1	3
OUT1	DAU メイン スパン							
OUT2	DAU サンプリング 正常							
OUT3	DAU 校正中							
1	4		RRY4(FIT)GY	DIO080104	104	デジタル出力	OUT0	DAU 校正中
							OUT1	DAU サブ ゼロ
							OUT2	DAU サブ スパン

1) データ収集ユニット

資料 2 データー収集ユニットのデバイスモジュール割り付け表

I/O コントローラー No.	チャンネル No.	デバイス型式	割付名	ID	信号種	接点 No.	信号名称
0	0	ADH2-8(FIT)GY	AIO080000	100	アナログ入力	0	ガス分析装置 1 O ₂ 濃度
						1	ガス分析装置 1 CO ₂ 濃度
						2	ガス分析装置 1 CH ₄ 濃度
						3	ガス分析装置 2 O ₂ 濃度
						4	ガス分析装置 2 CO ₂ 濃度
						5	ガス分析装置 2 CH ₄ 濃度
						6	A 室チャンバー 1 通気量
0	1	ADH2-8(FIT)GY	AIO080001	101	アナログ入力	0	A 室チャンバー 1 内 乾球温度
						0	A 室チャンバー 1 内 相対湿度
						1	A 室チャンバー 1 出口 乾球温度
						2	A 室チャンバー 1 出口 相対湿度
						3	A 室チャンバー 2 通気量
						4	A 室チャンバー 2 内 乾球温度
						5	A 室チャンバー 2 内 相対湿度
0	2	ADH2-8(FIT)GY	AIO080002	102	アナログ入力	0	A 室乾球温度
						1	A 室相対湿度
						2	B 室チャンバー 1 通気量
						3	B 室チャンバー 1 内 乾球温度
						4	B 室チャンバー 1 内 相対湿度
						5	B 室チャンバー 1 出口 乾球温度
						6	B 室チャンバー 1 出口 相対湿度
0	3	ADH2-8(FIT)GY	AIO080003	103	アナログ入力	0	B 室チャンバー 2 内 乾球温度
						1	B 室チャンバー 2 内 相対湿度
						2	B 室チャンバー 2 出口 乾球温度
						3	B 室チャンバー 2 出口 相対湿度
						4	B 室乾球温度
						5	B 室相対湿度
						6	大気圧
0	4	DI-32(FIT)GY	DIO080004	104	デジタル入力	0	ガス分析装置 1 ストリーム 01 選択
						1	ガス分析装置 1 ストリーム 02 選択
						2	ガス分析装置 1 ストリーム 03 選択
						3	ガス分析装置 1 ストリーム 04 選択
						4	ガス分析装置 1 ストリーム 05 選択
						5	ガス分析装置 1 ストリーム 06 選択
						6	ガス分析装置 1 メインゼロ選択
						7	ガス分析装置 1 メインスパン選択
						10	ガス分析装置 1 サブゼロ選択
						11	ガス分析装置 1 サブスパン選択

資料 2 つづき

I/O コントローラー No.	チャンネル No.	デバイス型式	割付名	ID	信号種	接点 No.	信号名称						
0	4	DI-32(FIT)GY	DIO080004	104	デジタル入力	12	ガス分析装置1 分析モード自動						
						13	ガス分析装置1 分析モード手動						
						14	ガス分析装置1 保守中						
						15	ガス分析装置1 自動チェック						
						16	ガス分析装置1 自動校正						
						17	ガス分析装置1 校正中						
						20	ガス分析装置1 O ₂ サブレンジ						
						21	ガス分析装置1 CO ₂ サブレンジ						
						22	ガス分析装置1 CH ₄ サブレンジ						
						23	ガス分析装置1 サンプリング						
						24	ガス分析装置1 電源断						
						25	ガス分析装置1 ストリームチェック(INT)						
						26	ガス分析装置1 校正チェック(INT)						
						27	ガス分析装置1 校正値読取(INT)						
						30	ガス分析装置1 自動校正(INT)						
						31	ガス分析装置2 ストリーム01 選択						
						32	ガス分析装置2 ストリーム02 選択						
						33	ガス分析装置2 ストリーム03 選択						
						34	ガス分析装置2 ストリーム04 選択						
						35	ガス分析装置2 ストリーム05 選択						
						36	ガス分析装置2 ストリーム06 選択						
						37	ガス分析装置2 メインゼロ選択						
						0	5	DI-32(FIT)GY	DIO080005	105	デジタル入力	0	ガス分析装置2 メインスパン選択
												1	ガス分析装置2 サブゼロ選択
												2	ガス分析装置2 サブスパン選択
												3	ガス分析装置2 分析モード自動
												4	ガス分析装置2 分析モード手動
												5	ガス分析装置2 保守中
												6	ガス分析装置2 自動チェック
												7	ガス分析装置2 自動校正
												10	ガス分析装置2 校正中
												11	ガス分析装置2 O ₂ サブレンジ
												12	ガス分析装置2 CO ₂ サブレンジ
												13	ガス分析装置2 CH ₄ サブレンジ
												14	ガス分析装置2 サンプリング
												15	ガス分析装置2 電源断
												16	ガス分析装置2 ストリームチェック(INT)
17	ガス分析装置2 校正チェック(INT)												
20	ガス分析装置2 校正値読取(INT)												
21	ガス分析装置2 自動校正(INT)												
22	A室チャンバー1 通気レンジ大												

資料 2 データー収集ユニットのデバイスモジュール割り付け表

I/O コントローラー No.	チャンネル No.	デバイス型式	割付名	ID	信号種	接点 No.	信号名称						
0	5	DI-32(FIT)GY	DIO080005	105	デジタル入力	23	A 室チャンバー1 通気レンジ小						
						24	A 室チャンバー1 起伏状態 1 (1: 横臥)						
						25	A 室チャンバー1 起伏状態 2 (1: 横臥)						
						26	A 室チャンバー1 保守中						
						27	A 室チャンバー1 通気量低下						
						32	A 室チャンバー2 通気レンジ大						
						33	A 室チャンバー2 通気レンジ小						
						34	A 室チャンバー2 起伏状態 1 (1: 横臥)						
						35	A 室チャンバー2 起伏状態 2 (1: 横臥)						
						36	A 室チャンバー2 保守中						
						37	A 室チャンバー2 通気量低下						
						0	6	DI-32(FIT)GY	DIO080006	106	デジタル入力	2	B 室チャンバー1 通気レンジ大
												3	B 室チャンバー1 通気レンジ小
												4	B 室チャンバー1 起伏状態 1 (1: 横臥)
5	B 室チャンバー1 起伏状態 2 (1: 横臥)												
6	B 室チャンバー1 保守中												
7	B 室チャンバー1 通気量低下												
12	B 室チャンバー2 通気レンジ大												
13	B 室チャンバー2 通気レンジ小												
14	B 室チャンバー2 起伏状態 1 (1: 横臥)												
15	B 室チャンバー2 起伏状態 2 (1: 横臥)												
16	B 室チャンバー2 保守中												
17	B 室チャンバー2 通気量低下												
20	A 室チャンバー1 前扉												
21	A 室チャンバー2 前扉												
22	B 室チャンバー1 前扉												
23	B 室チャンバー2 前扉												
24	A 室チャンバー1 後扉												
25	A 室チャンバー2 後扉												
26	B 室チャンバー1 後扉												
27	B 室チャンバー2 後扉												
0	7	DO-16(FIT)GY	DIO080007	107	デジタル出力	Y00	ガス分析装置 1 ストリーム 01 選択						
						Y01	ガス分析装置 1 ストリーム 02 選択						
						Y02	ガス分析装置 1 ストリーム 03 選択						
						Y03	ガス分析装置 1 ストリーム 04 選択						
						Y04	ガス分析装置 1 ストリーム 05 選択						
						Y05	ガス分析装置 1 ストリーム 06 選択						
						Y06	ガス分析装置 1 メインゼロ選択						
						Y07	ガス分析装置 1 メインスパン選択						
						Y10	ガス分析装置 2 ストリーム 01 選択						
						Y11	ガス分析装置 2 ストリーム 02 選択						

資料 2 つづき

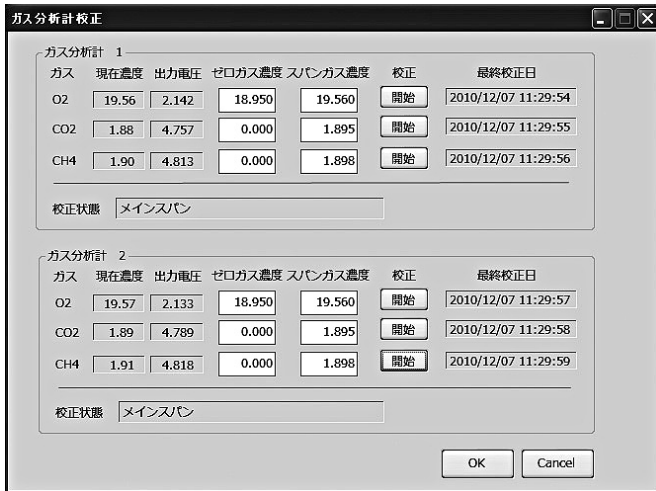
I/O コントローラー No.	チャンネル No.	デバイス型式	割付名	ID	信号種	接点 No.	信号名称
0	7	DO-16(FIT)GY	DIO080007	107	デジタル出力	Y12	ガス分析装置2 ストリーム 03 選択
						Y13	ガス分析装置2 ストリーム 04 選択
						Y14	ガス分析装置2 ストリーム 05 選択
						Y15	ガス分析装置2 ストリーム 06 選択
						Y16	ガス分析装置2 メインゼロ選択
						Y17	ガス分析装置2 メインスパン選択
						
1	0	DO-16(FIT)GY	DIO080200	108	デジタル出力	Y00	ガス分析装置1 サブゼロ選択
						Y01	ガス分析装置1 サブスパン選択
						Y02	ガス分析装置1 校正選択
						Y03	ガス分析装置1 校正読取完了
						Y12	ガス分析装置2 校正選択
						Y13	ガス分析装置2 校正読取完了
						
1	1	CNT16-8(FIT)GY	CNT080201	109	パルス入力	0	A 室チャンバー1 加湿量
						1	A 室チャンバー2 加湿量
						2	B 室チャンバー1 加湿量
						3	B 室チャンバー2 加湿量
						4	A 室チャンバー1 空調ドレイン
						5	A 室チャンバー2 飲水量
						6	B 室チャンバー1 空調ドレイン
						7	B 室チャンバー2 飲水量
.....							
1	2	CNT16-8(FIT)GY	CNT080202	110	パルス入力	0	A 室チャンバー1 空調ドレイン
						1	A 室チャンバー2 飲水量
						2	B 室チャンバー1 空調ドレイン
						3	B 室チャンバー2 飲水量

資料 3 代謝実験データ収集プログラム実行画面



デバイス初期化画面

資料 3 つづき



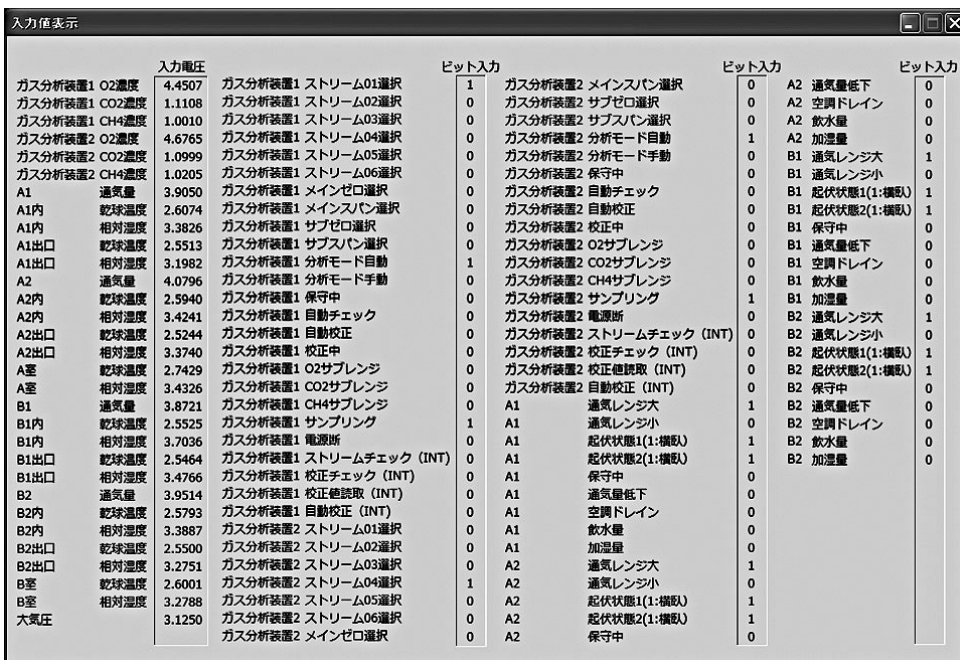
ガス分析計校正画面



試験データ記録画面



サンプルガス流路・測定方法設定画面



入力値表示画面

資料 4 出力例

名称	実験室	実験室	実験室	実験室	チャンパー	チャンパー	チャンパー	チャンパー	チャンパー
	測定時刻	酸素濃度	二酸化炭素濃度	メタン濃度		測定時刻	酸素濃度	二酸化炭素濃度	メタン濃度
		%	%	%		%	%	%	%
B	10/06/10:32:39	20.88	0.0785	0.0017	B2	10/06/10:35:39	20.37	0.5893	0.0386
B	10/06/10:37:09	20.89	0.0725	0.0015	B2	10/06/10:40:09	20.32	0.6271	0.0416
B	10/06/10:41:39	20.89	0.0721	0.0010	B2	10/06/10:44:39	20.29	0.6770	0.0477
B	10/06/10:46:09	20.89	0.0667	0.0008	B2	10/06/10:49:09	20.26	0.7177	0.0497
B	10/06/10:50:39	20.89	0.0664	0.0010	B2	10/06/10:53:39	20.24	0.7527	0.0541
B	10/06/10:55:09	20.90	0.0634	0.0008	B2	10/06/10:58:09	20.22	0.7805	0.0578
B	10/06/10:59:39	20.90	0.0617	0.0006	B2	10/06/11:02:39	20.19	0.8171	0.0597
B	10/06/11:04:09	20.90	0.0612	0.0004	B2	10/06/11:07:09	20.18	0.8276	0.0606
B	10/06/11:08:39	20.90	0.0603	0.0004	B2	10/06/11:11:39	20.18	0.8419	0.0616
B	10/06/11:13:09	20.90	0.0581	0.0002	B2	10/06/11:16:09	20.17	0.8727	0.0652

データ収集ユニット出力 (ガス濃度)

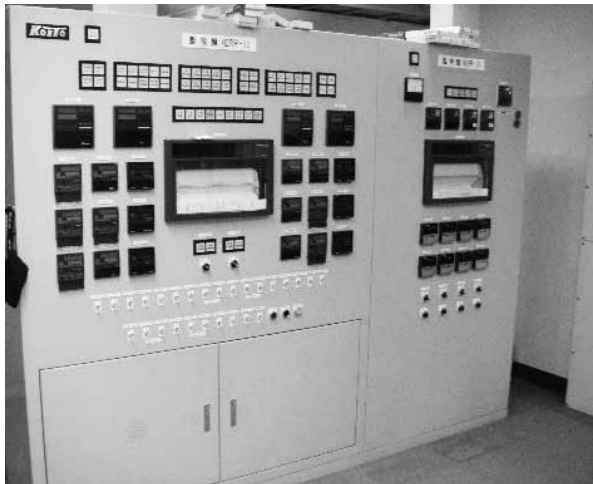
実験室名称	実験室測定時刻	実験室温度℃	実験室湿度%	実験室大気圧mmHg	チャンパー名称	チャンパー内		チャンパー出口		チャンパー出口		家畜横臥時間秒	家畜飲水量L	チャンパー内		チャンパー		
						温度℃	湿度%	温度℃	湿度%	湿度%	真の乾き通気量NL/分			加湿量L	空調ドレンL	前部扉開=1	後部扉開=1	
B	10/06/10:36:03	20.29	66.08	748.5	B2	19.75	59.87	20.36	50.03	458.6	448.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0
B	10/06/10:37:03	19.99	66.52	748.6	B2	19.83	59.52	20.30	50.33	457.7	447.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0
B	10/06/10:38:03	19.82	66.12	748.7	B2	19.98	59.57	20.26	50.59	460.7	450.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0
B	10/06/10:39:03	19.55	65.87	748.8	B2	19.86	59.51	20.24	50.80	459.1	449.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0
B	10/06/10:40:03	19.32	65.51	748.9	B2	19.92	59.61	20.27	50.90	459.6	449.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0
B	10/06/10:41:03	19.05	65.28	748.8	B2	19.97	59.61	20.13	51.09	458.7	448.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0
B	10/06/10:42:03	18.87	64.75	748.7	B2	19.82	59.71	20.06	51.32	459.5	449.4	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0
B	10/06/10:43:03	18.70	64.82	748.7	B2	19.85	59.60	20.12	51.36	459.9	449.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0
B	10/06/10:44:03	18.51	65.51	748.6	B2	19.79	59.70	20.02	51.46	458.4	448.3	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0
B	10/06/10:45:03	18.36	64.85	748.5	B2	19.77	60.00	19.91	51.78	458.7	448.5	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0

データ収集ユニット出力 (ガス濃度以外)

実験室名称	実験室測定時刻	実験室温度℃	実験室湿度%	実験室大気圧mmHg	チャンパー名称	チャンパー内		チャンパー出口		チャンパー出口		家畜横臥時間秒	家畜飲水量L	チャンパー内		チャンパー		家畜呼吸量L/分	家畜呼吸量L/分	家畜呼吸量L/分	家畜呼吸量L/分	
						温度℃	湿度%	温度℃	湿度%	湿度%	真の乾き通気量NL/分			加湿量L	空調ドレンL	前部扉開=1	後部扉開=1					
B	10/06/10:36:03	20.29	66.08	748.5	B2	19.75	59.87	20.36	50.03	458.6	448.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:37:03	19.99	66.52	748.6	B2	19.83	59.52	20.30	50.33	457.7	447.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:38:03	19.82	66.12	748.7	B2	19.98	59.57	20.26	50.59	460.7	450.8	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:39:03	19.55	65.87	748.8	B2	19.86	59.51	20.24	50.80	459.1	449.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:40:03	19.32	65.51	748.9	B2	19.92	59.61	20.27	50.90	459.6	449.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:41:03	19.05	65.28	748.8	B2	19.97	59.61	20.13	51.09	458.7	448.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:42:03	18.87	64.75	748.7	B2	19.82	59.71	20.06	51.32	459.5	449.4	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:43:03	18.70	64.82	748.7	B2	19.85	59.60	20.12	51.36	459.9	449.9	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:44:03	18.51	65.51	748.6	B2	19.79	59.70	20.02	51.46	458.4	448.3	0	0.0	0.0	0.0	0.0157	0	0	0	0	0	0
B	10/06/10:45:03	18.36	64.85	748.5	B2	19.77	60.00	19.91	51.78	458.7	448.5	0	0.0	0.0	0.0	0.0000	0	0	0	0	0	0

代謝演算出力

資料 5 代謝実験棟概要



監視盤 ERP-1 (手前) および ERP-2 (奥)



データ収集ユニットに付属する PC



呼吸試験チャンバー



地下チャンバー

Construction and Operation of Gas-Stream Control Unit and Data Acquisition Unit in Indirect Calorimeter for Cattle

Tomoyuki Suzuki¹⁾, Yuko Kamiya, Mitsuru Kamiya and Masahito Tanaka

Summary

For over 30 years, an open-circuit, indirect calorimetry system for cattle in the Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization, has provided data on energy requirements of cattle in a hot environment and data on the nutritive value of feed produced in the southwest region of Japan. This time, we upgraded a gas stream control unit connected to a gas analyzer, and also data acquisition unit using commercially produced device modules, and developed programs for controlling these units. This upgraded system continuously monitors oxygen (O₂), carbon dioxide (CO₂), and methane (CH₄) concentrate in the four chambers and the ambient environment, and outputs the gas metabolism per minute using a fast-response method. The average recovery rate of CO₂ from chambers was 98.8% (from 97.5% to 101.3%). When we adopted a fast-response method, the diurnal changes of heat produced by four Holstein lactating cows corresponded well with the changes in their activities, such as eating, rumination, and standing or lying. The daily heat production was closely related to the dry matter intake and milk yield. It was showed that this upgraded system is able to provide reliable data for further study on energy metabolism.

Key words : Cattle, energy metabolism, fast-response method, indirect calorimetry.