

自動搾乳システムの運用における最適化に関する研究

小 宮 道 士

Studies of Optimum Operation on Automatic Milking System

Michio KOMIYA

酪農学園大学紀要 別 刷 第 31 卷 第 2 号

Reprinted from

”Journal of Rakuno Gakuen University” Vol.31, No.2 (2007)

自動搾乳システムの運用における最適化に関する研究

小 宮 道 士

Studies of Optimum Operation on Automatic Milking System

Michio KOMIYA
(October 2006)

目 次

第1章 緒論	4.2.1 方法
1.1 はじめに	4.2.2 結果および考察
1.2 自動搾乳システムの概要	4.3 搾乳ストールにおける乳牛入退出時間の計測 と退出装置の試作
1.3 自動搾乳に関する既往の研究	4.3.1 装置および方法
1.4 本論文の目的と構成	4.3.2 結果および考察
第2章 慣行搾乳システムにおける作業者の労働負 担	4.3.2.1 進入・退出時間
2.1 緒言	4.3.2.2 音刺激による退出装置の効果
2.2 方法	4.4 摘要
2.2.1 労働負担量の評価法	第5章 自動搾乳システムの搾乳能率に関する数理 解析
2.2.2 試験条件と搾乳シミュレーション	5.1 緒言
2.3 結果および考察	5.2 方法
2.3.1 搾乳方式と労働負担量	5.2.1 自動搾乳システムの理論搾乳頭数
2.3.2 シミュレーションによる搾乳労働負担量	5.2.2 数理的モデルにおける各定数の算出
2.4 摘要	5.2.2.1 実稼働時間の計測
第3章 乳牛の乳器形状と自動搾乳システムへの適 合性	5.2.2.2 搾乳作業時間の計測
3.1 緒言	5.3 結果および考察
3.2 方法	5.3.1 実稼働時間
3.3 結果および考察	5.3.2 各システムの搾乳作業時間
3.3.1 自動搾乳システムを導入した農場の牛群乳 頭間隔	5.3.3 理論搾乳頭数による各システムの評価
3.3.2 自動搾乳システム移行前の乳頭間隔と搾乳 ロボット適合性	5.4 摘要
3.3.3 自動搾乳システム移行後の搾乳成功率	第6章 自動搾乳システムの運用における最適化
3.4 摘要	6.1 緒言
第4章 乳牛の乳頭位置座標の経日、経年変化や搾 乳ストール内滞在が自動搾乳システムの運 用に及ぼす影響	6.2 方法
4.1 緒言	6.2.1 給餌速度モデルと実証試験
4.2 分娩後日数および産次と乳頭位置座標の変化	6.2.2 システム記録データの解析
	6.3 結果および考察
	6.3.1 給餌速度
	6.3.2 システム稼働率
	6.4 摘要
	第7章 総括
	7.1 慣行搾乳システムにおける作業者の労働負担

- (第2章)
- 7.2 乳牛の乳器形状と自動搾乳システムへの適合性 (第3章)
- 7.3 乳牛の乳頭位置座標の経日, 経年変化や搾乳ストール内滞在が自動搾乳システムの運用に及ぼす影響 (第4章)
- 7.4 自動搾乳システムの搾乳能率に関する数理解析 (第5章)
- 7.5 自動搾乳システムの運用における最適化(第6章)
- 量記号一覧
謝辞
参考文献
Summary

第1章 緒 論

1.1 はじめに

搾乳器具の歴史は紀元前380年までさかのぼると言われている¹⁴⁾。しかし、乳牛に対して機械による搾乳が試みられるようになったのは19世紀の中頃である。黎明期の搾乳機械には真空圧を使用したものと乳頭を外側から押しつぶして絞り出す手搾りを機械化したものが存在し、前者は今日の搾乳機械の基本原則として広く用いられているが、後者の方式は現在その姿を見ることはない。

真空圧方式による搾乳機械は1851年にイギリスで考案された。しかし、その後1860年にアメリカで乳頭だけに真空が作用するように改良された機械が考案され、これが最初の搾乳機械とされている。1897年には小型の真空発生装置とパルセータが使用されるようになった。金属シェルとライナゴムという現在のような2重構造のティートカップが使用されるようになったのは1900年代に入ってからである。そして、1918年には牛舎内に真空配管を敷設したシステムが完成した。

国内では1955年頃からこのような搾乳機械が使われるようになり、1960年代に入って急速に普及した⁵⁹⁾。当初は、真空配管のみで生乳を集乳缶に集めるバケツ方式であったが、やがて牛乳配管も備えたパイプライン方式が使用されるようになった。1990年頃からは経営規模の拡大に伴い乳牛の飼養形態も変化し、繋ぎ飼い牛舎からフリーストール牛舎へ、搾乳も搾乳室(パーラ)で行うところが徐々に増え始めた。

近年になってからの搾乳システムの大きな改良は、真空2系統方式(定圧式ミルクロー)と自動離脱装置(ACR: Automatic Cluster Removal)で

ある。前者は牛乳配管の真空圧を高くして牛乳の流れを良くするとともに、フロートもしくはニードルバルブによってミルクロー内の真空圧を一定に保ち、射乳量の減少による高真空圧が乳頭に作用する従来型クローの欠点を改善した⁷⁷⁾。後者は射乳量の減少を機械的あるいは電氣的に検出して搾乳中のユニットへの真空を遮断し、ユニットを乳房から自動的に引き離す装置である^{49,55,66)}。両者の機器は搾乳終了時の高い真空圧が乳頭組織に及ぼす影響を回避する効果があるという点で共通している。しかし、繋ぎ飼い牛舎でのACRを装備した搾乳ユニットの利用は、搾乳ユニット重量の増加のため、ユニット運搬時の作業者の負担を増す原因ともなった。これを改善するため牛舎内にレールを架設して運搬重量を軽減する懸架式ミルクが開発された。

乳牛の飼養管理作業は、これらの搾乳機械や牛舎施設の改良、管理方式の変化に伴って年々減少し、北海道では1990年から2000年までに搾乳牛一頭当たりの年間労働時間が平均115時間から101時間に減少している²⁴⁾。一方、そのうち搾乳作業が占める時間割合は、1990年の53.5%から現在もほぼ同じ割合にあり、さらにこの割合は大規模化で飼養頭数が増えるとともに大きくなる傾向にある。したがって、酪農を取り巻く市場経済の変革の中で、国際競争に打ち勝つ経営を確立させるためには、搾乳作業の益々の省力化が大きな課題と言える。

繋ぎ飼い、牛舎内搾乳からフリーストール、パーラ搾乳方式への転換には、多頭数の乳牛を搾乳するための能率面だけでなく、搾乳ピット内での省力的な搾乳が可能である点も理由にあげられる。さらに乳牛の生活空間とは別の搾乳専用室であるパーラは、乳牛の識別、搾乳ストール出入口の開閉、ユニットの離脱、個体乳量の記録などの自動化を容易にした。しかし、これらのパーラにおいても、搾乳準備のための乳頭清拭や前搾り作業、ティートカップの取り付けなどに人的作業は不可欠であった。

やがて1990年代の前半からオランダやドイツなどのヨーロッパ諸国では、搾乳作業の完全自動化を行う搾乳ロボットと牛舎内における乳牛の自発的搾乳を促す施設設備の配置を含めた自動搾乳システム(Automatic Milking System)の研究が精力的に行われるようになり、次節に述べる搾乳作業を完全に自動化する技術が確立された。

1.2 自動搾乳システムの概要

国内で導入されている自動搾乳システムは、その多くが1台の自動搾乳機を箱形の搾乳ストールに1

つ内蔵し、これをフリーストール牛舎内に設置したシングルボックスタイプと呼ばれるシステムである。そこで、図 1-1 には 1999 年時点で我が国に導入されている 4 社の自動搾乳システムの外観を、表 1-1 には諸元、搾乳・洗浄方式、乳牛の適合性を、図 1-2 には搾乳シーケンスをまとめた。

各社のシステムに共通する点は、搾乳ストール内に個体識別装置、配合飼料給餌装置、ロボットアーム、真空発生装置、温水器、洗浄ユニット、各種制御装置が組み込まれた箱形のユニットとして構成されていることである。①を除く 3 社のシステムでは、ティートカップはロボットアームと一体化しており、搾乳時にアームは乳牛の下に留まる。また③のシステムは乳頭位置を検出後にセンサ部がティートカップアームと分離し、初期位置へ復帰する。しかし、①のシステムは 4 本のティートカップとそれを取り付けるマニピュレータが完全に独立しており、搾乳時はティートカップのみが乳頭に取り付いた状態で従来の搾乳方式と変わらない。

乳頭の位置検出は大きく 2 段階に分けて行われ、これは 4 社に共通する。最初はストール内の乳牛の体長に合わせて飼槽を前後方向に移動させ、乳牛の座骨に押し当てる牛体位置センサなどでストール内における乳房の概略位置を決定する。その後、詳細位置センサにより、乳頭の正確な位置決めが行われる。センサの計測には CCD カメラとレーザー光の光

切断画像による方法(①)、フォトダイオードアレイによる方法(②)、超音波やレーザによる測距方法(③、④)がある。測距では反射表面の状態により精度が低下することがあり、乳房の毛刈りが推奨される。また、乳頭位置に関するデータは導入時のティーチング以降、乳牛の馴致期間に個体情報の一部として記録され、その後も搾乳の度に更新される。

自動搾乳に適合する乳牛の体長は、各社における牛体位置検出センサの検出許容範囲による。①を除くティートカップ一体型のロボットアームにおいて装着可能な乳頭間隔は、後方の乳頭では 2 つがほぼ接触した状態でも可能であるが、前の乳頭間は若干広い間隔が必要である。②はティートカップ下端が柔軟な構造であるので、比較的自由度が高い。①のシステムでは、ティートカップが個々に取り付け可能なので、制約がない。乳頭先端地上高は各社とも 35 cm 以上で、これは従来の搾乳機とほぼ同じである。

搾乳前の乳頭洗浄は搾乳カップ取り付け前の乳頭に専用の洗浄カップを挿入して行う方式(①)、ティートカップ取り付け後にカップ内で行う方式(③)、2本の回転ローラで乳頭を挟むようにして行うもの(②、④)がある。ローラ方式は洗浄スポンジやタオルを使用回数に応じて交換する必要がある。また③のティートカップはライナ内に乳頭洗浄水の噴射ノズルと乾燥空気の吹き出し口があり、従

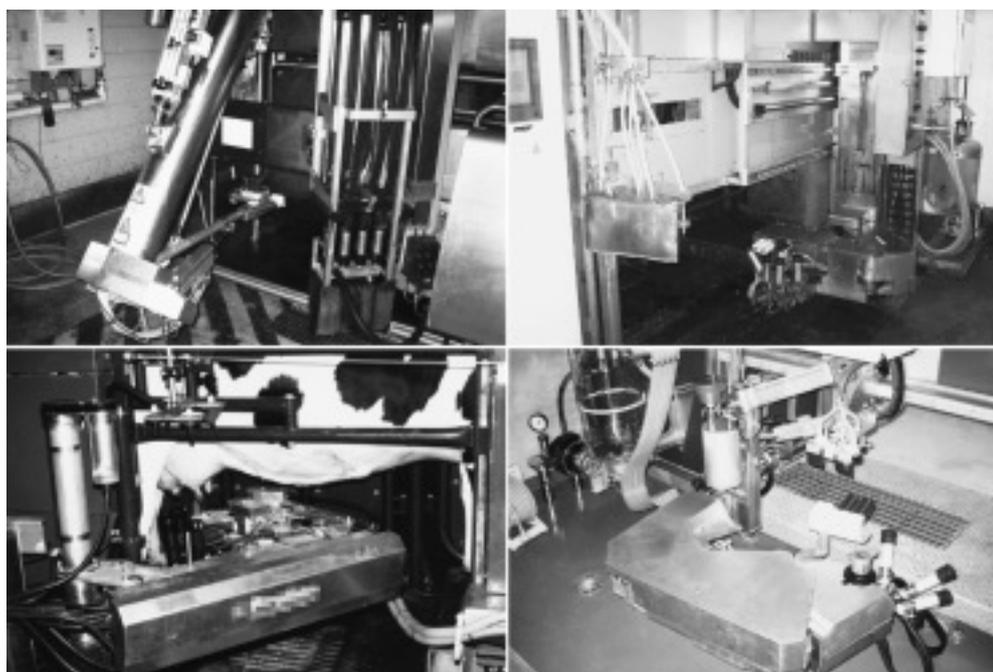


図 1-1 自動搾乳システム（搾乳ロボット）の外観
（左上：①D社、左下：②O社、右上：③P社、右下：④L社）

表 1-1 搾乳システム（ストール）の諸元、搾乳および洗浄方式と乳牛適合性の比較
 （各社カタログ、仕様書より）

	①	②	③	④
製造元	D社	O社	P社	L社
寸法				
全長 [m]	3.25	4.25	5.80	4.23
全幅 [m]	2.00	2.05	1.75	1.85
全高 [m]	2.75	2.25	2.46	2.20
位置検出				
牛体位置	飼槽移動 超音波センサ	牛体位置センサ 超音波、レーザーセンサ	飼槽移動	牛体位置センサ 超音波センサ
乳頭位置	CCDカメラ、レーザー光	フレーム型遮光式センサ	超音波センサ	レーザー
マンピュレータ	4ティートカップ分離 空気圧駆動	搾乳ユニット一体 空気圧駆動	センサユニット分離 電気、空気圧駆動	搾乳ユニット一体 電気、空気圧駆動
乳頭洗浄	専用洗浄ティートカップ	スポンジブラシ	ティートカップ内洗浄	クリーニングローラ
ブラインド搾乳	※1	3乳頭まで	1乳頭まで*2	可能
ディッピング	マンピュレータ付属	マンピュレータ付属	オプション	マンピュレータ付属
機器洗浄				
ティートカップ洗浄	1頭毎	1頭毎	※1	1頭毎
ミルクライン洗浄	10頭毎（水） 8時間毎（アルカリ）	トリプル洗浄	搾乳がないとき*3 1日2回（洗剤）	10頭または45分毎（水） 8時間毎（アルカリ）*3 48時間毎（酸）*3
乳牛適合性				
体長	制限なし	※1	213～240cm 前後脚間110～135cm	190～250cm 体巾76cm以内
乳頭間隔（左右）	制限なし	4～32cm	前側10～25cm 後側1～20cm	前12.5～30cm 後側3cm以上
（前後）	制限なし	4～32cm	右側8～18cm 左側6～18cm	7cm以上
乳頭先端地上高	35cm以上	38～68cm	35～65cm	35cm以上
乳頭間高低差	※1	8cm以内	5cm以内	3cm以上の オーバーラップ
乳頭の傾き	45度以下	45度以下	30度以内*2	30度以内

※1 記載事項なし ※2 基準乳頭は除く ※3 時間設定可能

来のカップに比べ構造が複雑である。

搾乳後のティートカップ洗浄は③のシステムを除き1頭毎にバックフラッシュ洗浄が行われる。また、10頭毎あるいは設定された時間間隔でミルクラインのショートクリーニングが実行される。さらに8時間毎（①、④）にアルカリ洗浄が行われる。①のシステムでは乳牛が出た後にストール床を自動洗浄し、ショートクリーニング時にはティートカップ外筒の洗浄も行われる。これらの機能は搾乳後の乳質に影響するものではないが、面倒になりがちなロボット部分の清掃を省力化するものである。しかし、北海道のような寒冷地における冬季間の使用には凍結に対する注意を要する。

自動搾乳システムでは24時間不定時に搾乳が可能であるが、システムの洗浄中は搾乳をすることができない。これらの時間は1日の内およそ1～2時間程度と言われている。また、集乳後のバルククーラ洗浄時も同様である。しかし、主バルククーラの他に予備のバルククーラを備えることでバルククー

ラ洗浄時の搾乳は可能である。

個体管理コンピュータは、搾乳時に記録された乳量や搾乳速度、搾乳ストールを訪れた時刻や回数などのデータを搾乳ロボットの制御コンピュータから受け取り、生年月日や個体番号、産次数や分娩予定日などの繁殖情報（カウカレンダ）などととも牛群全体を管理する。乳牛はシステム洗浄時以外、いつでも搾乳室へ入ることができる。ただし、管理コンピュータは、個体識別装置により前回の搾乳からの経過時間や進入時点での予想乳量などにより、設定された条件を満たさない個体の場合、搾乳しないまま退出させる。搾乳プロセスへ移行した個体のみ個々に設定された濃厚飼料が与えられる。

搾乳が始まる前に乳房は回転ブラシで、また乳頭はティートカップ装着後にカップ内で洗浄される。ロボットアームなどでティートカップが装着された後、最初の乳汁は温度や体細胞数などが検査され異常乳は別に集められる。搾乳の終了は乳汁の流出量や前回の搾乳データから決定する。ティートカップ

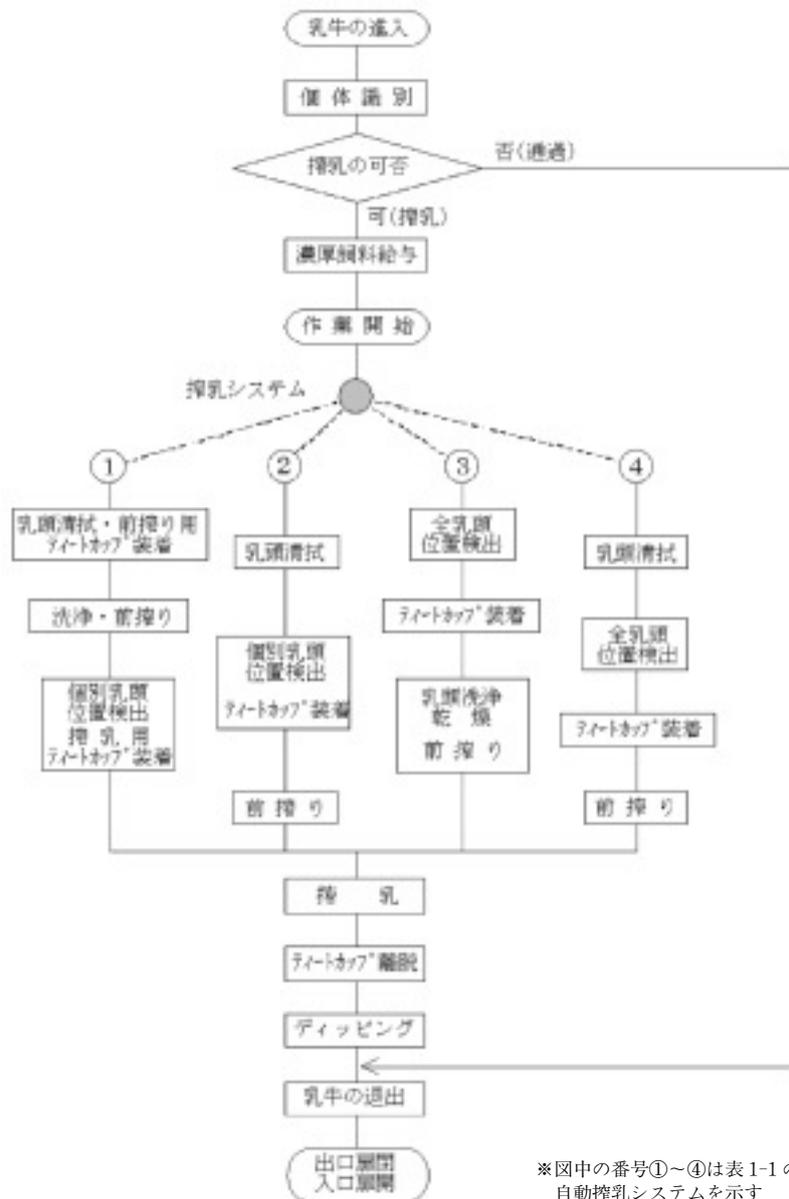


図 1-2 各システムの搾乳シーケンス

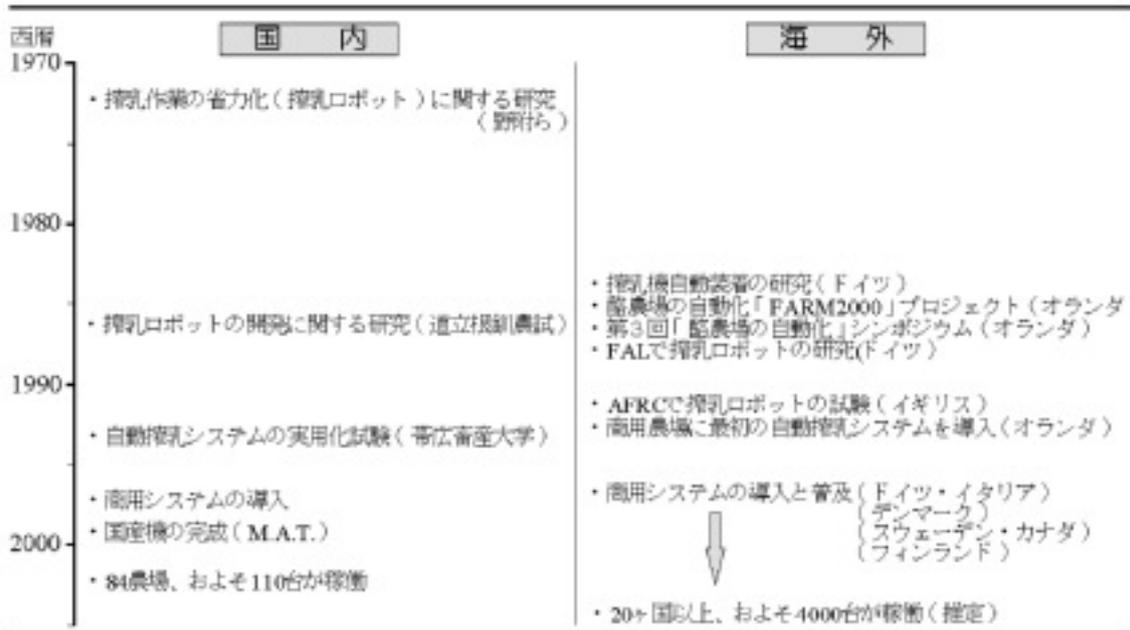
が外され、ディッピングの後、乳牛はストールから退室する。搾乳時に生乳の電気伝導度を測定して、前回搾乳時のデータあるいは分房間の差異から基準値以上の変化が認められた場合には牛群管理ソフトウェアが乳房炎感染の疑いを知らせる。さらに歩行数や体重などのデータはこれを計測する機器を用意することにより利用可能となる。

1.3 自動搾乳に関する既往の研究

表 1-2 には国内外における自動搾乳システムの研究と商用機普及の過程を示す。我が国における自動搾乳の研究は農林水産技術会議が 1972~1976 年の 5 年間に実施した「搾乳作業の省力化に関する研

究」^{47,58)} が最初であった。これらの研究では、それまでのバケット式ミルクからパイプライン式へと普及が進む中で一層の搾乳効率の向上を目的に行われた。研究では搾乳機の離脱、ユニットの移動などを自動的に行い、繋ぎ飼ひ牛舎での利用を主体とした半自動式の搾乳装置と、さらに乳房の洗浄、ユニットの取り付けまでを自動化した搾乳ストール型の全自動式搾乳機が試作された。当時の搾乳機に関する研究の多くは、パーラにおける自動離脱のための搾乳量の計測方法やセンサの開発^{9,63,79,83)} などであったことを考えると、搾乳の自動化を目的に最初に日本で行われたこの実用試験は先端的であったと言える。しかし、残乳などの問題からマシンストリップ

表 1-2 自動搾乳システムの発達史



ングが課題とされた。その後、日本では1986年から北海道立根釧農業試験場と北海道立工業試験場が共同で搾乳ロボットに関する開発、研究を行い²⁵⁾、搾乳ストールと乳頭検出センサの試作機により性能を試験した。著者らはこれらの研究が課題としていた乳頭検出を乳牛に対して検出部を近づけることなく可能にするステレオ画像法による方法について検討し、また搾乳機装着に円筒座標型マニピュレータを使用して、乳房模型による搾乳機の装着シミュレーションを試みた。その結果、乳頭高さの測定誤差は平均1.5mm(最大6.7mm)、水平誤差は平均1.2mm(最大2.1mm)で、装着可能な検出精度が得られることを確認した⁴⁴⁾。しかし、これらの研究は乳牛の搾乳試験をするまでに至らなかった。

海外における自動搾乳を目的とした研究は、1980年代後半からOrdolf^{61,62)}によって搾乳機の自動装着や安全性に関する研究が始められた。1990年に入って自動化を実現するセンサやアクチュエータの小型化、高性能化とともに多回搾乳による乳生産性の向上と乳牛の自発的不定時自由搾乳による家畜福祉の観点から自動搾乳の研究に関心が集まるようになった。こうしてヨーロッパ、特にオランダを中心としてドイツ、イギリス、フランスなどの公的試験機関や民間企業において搾乳の自動化、ロボット化の研究、開発が盛んに行われるようになった⁷³⁾。1995年にはオランダにおいて商用化された自動搾乳機の導入が始まり、多頭化による規模拡大とは別に家族経営規模の60~80頭規模の酪農家で1日3回以上

の搾乳を行い、生産量の増加を雇用労働なしに実現する自動搾乳システムと呼ばれ始めた機械に酪農家の注目が集まるようになった。やがて自動搾乳システムは世界中でその台数を増やし、2003年末には13ヶ国以上でおよそ2200台が稼働するまでになり⁴⁶⁾、2005年には20ヶ国以上で推定4000台以上が稼働していると考えられる。一方、日本では93年に帯広畜産大学と士幌町の酪農家でP社(オランダ)による自動搾乳システムの実用化試験が開始され、97年にはL社(オランダ)のシステムが札幌近郊の酪農家に導入されるなど、日本国内においても早い段階から注目を集めてきた。そして99年秋にはO社が国産の搾乳ロボットを開発し、また2000年以降には、D社(スウェーデン)やW社(ドイツ)などが国内市場へ新規参入している。2002年において国内では84農場、およそ110台以上の自動搾乳システムが使用されている⁶⁾。

自動搾乳システムに関する初期の研究は前述のOrdolf⁶¹⁾により搾乳機を自動装着するための検出方法や、装着を容易にする搾乳ストールの床構造に関して検討された。

これらの研究においては搾乳ストール内で予め記録された乳牛個体の乳頭位置座標とさらに正確な位置をセンサによって求め、装着の際に乳頭の動きに追従する方法が検討され^{10,22)}、またArtmannら⁴⁾はヨーロッパにおける7つの試験研究機関および民間企業の乳頭検出方法を整理し、報告している。自動搾乳システムの中には乳頭への位置決めをデータ

ベースに依存するものもあるが⁴⁸⁾、乳牛の乳頭位置は泌乳段階や産次、あるいは搾乳の前後で変化されると言われている^{50,76)}。したがって、この方法では経時変化や装着時の乳牛挙動によって装着率の低下をまねくという欠点が生じる。搾乳の自動化を実現するためには、人間の経験と推察力にかなわずとも、搾乳時の乳牛の挙動に臨機応変に対応し、また乳頭位置検出も短時間に終了することが望ましい。

搾乳機の取り外しは従来の離脱装置と同様、センサーで乳汁が検出されなくなった時に行う。Mottramら⁵⁷⁾は自動搾乳システムのために家畜の泌乳期間における最大搾乳速度の変化を調べた。初期のシステムにおいては、4ティートカップが同時に離脱するユニット単位であったが、その後過搾乳防止の観点から乳頭毎に乳汁の流出速度が計測されるようになり、個別に離脱する方法が主流となった。

Schlunsenら⁷²⁾は乳牛の健康状態や発情時期を自動的に検出する方法について検討した。その中で乳房炎や代謝機能の疾病を発見するパラメータとしては、乳汁の電気伝導度、温度、乳量や乳脂率などが、また発情を知る手がかりとして行動量や乳汁の温度、乳量などが有効であると報告している。最近の研究ではEspadaら¹¹⁾が生乳の色を計測して異常乳を判別する方法を報告した。これらの研究から搾乳時に乳汁の温度、体細胞数や電気伝導度などを記録し、異常があれば過去のデータを参考にして発情や乳房炎などの判断を行う機能が自動搾乳システムに付加されている。また、作業者は自動搾乳により生じた余剰時間を利用して細かな個体観察を行い、より一層乳牛の健康管理に努めることができる。

乳牛の突発的な行動による搾乳作業中の事故は決して希有なことではない。無人の自動搾乳においてもこの点に注意を払わねばならない。なぜなら、これらの事故が起こった場合搾乳機械に損害を与えるばかりでなく、家畜にとっても不幸な結果となるからである。Ordolff⁶²⁾は40 kg以下の体重変動を検出し、搾乳刺激を与えることで機械を取り付けるときの乳牛の動作回数が減少したと報告している。また、Mottram⁵⁶⁾は床の構造と動作回数について触れ、搾乳機の取り付けを容易にする中央が凸状のストラット床は動作回数に関しては逆に増加させると述べている。

作業者の労働に依存する従来の搾乳方式では朝夕2回の搾乳が限界であった。しかし、自動搾乳では乳牛の自発的搾乳による3回以上の搾乳が可能になり、生産量の増加が期待できる。Hillertonら²⁰⁾は1日2回搾乳と4回搾乳の乳生産量の違いについて報

告した。またIpemaら³³⁾は自動給餌ステーションを利用した24時間の自発的多搾乳の試験を36週にわたって実施し、乳量、乳成分、乳牛の健康状態などについてパーラ搾乳と比較した。100日以上試験を行った乳牛の平均搾乳回数は3.9回であり、乳量は全泌乳期間にわたって14%程増加することが示された。多搾乳牛において、乳成分中のタンパク質と乳脂率は試験開始初期が特に低く、その結果乳脂肪分とタンパク質の生産量の増加は約10%であるとしている。しかし、2期目以降の泌乳期では通常搾乳の場合とほぼ同様の百分率に回復し、更に生産量が増大すると述べている。繁殖障害や疾病に関しても多搾乳との関連は認められないと報告している。

自動搾乳システムの価格はシングルボックスタイプでおよそ3,000万円である。導入に際しては既存の施設や飼養頭数、導入後の搾乳回数などを考慮して、生産量が増加するように検討されなければならない。Parsons⁶⁴⁾は従来のパーラと自動搾乳システムを比較して導入の際の経済的な分析を行い、60頭以上の飼養規模で1日2回搾乳と比較して年間1頭あたり48~72ポンド(およそ9,810~14,730円)の増収になると報告している。また、発情や疾病の発見など個体管理の面において年間1頭あたり17ポンド(およそ3,480円)程度節減が期待できるとしている。

近年になって開催された2つの自動搾乳に関するシンポジウムでは機械や技術的問題に対する研究は少なくなり、自動搾乳システムにおける衛生上の問題、乳質や家畜の福祉に関する課題などソフト面での研究が多くなった^{41,81)}。これらは自動搾乳システムが多くの酪農家に受け入れられ、利用の過程で発生した新たな課題と推察される。

Halachmiら^{18,19)}は施設利用性や乳牛行動の側面から自動搾乳システム牛舎の最適なレイアウトを提案した。また、森田ら⁵³⁾も同様に国内における自動搾乳システムを前提としたフリーストール牛舎の設計についてストール配列、飼槽数の観点から考察した。河端ら³⁸⁾は搾乳機の装着時間の短縮と装着成功率の向上を目的に分散制御方式のシステムについて研究した。また、国内においては依然、主要な飼養管理方式である繋ぎ飼いで搾乳を省力化することを目的に、八谷ら^{16,17)}は繋ぎ飼用搾乳ロボットについての研究を行った。

国内における導入事例の増加とともに、自動搾乳機を導入した酪農場での調査事例が報告されるようになった。時田ら⁸⁰⁾は導入1年以上経過した31戸

の酪農家において既存搾乳施設との併用、牛群の搾乳ストール進入回数や搾乳回数などを調査し、自動搾乳システムにおける乳牛の搾乳回数は牛舎内の乳牛行動の制限や施設併用と関係がないことを明らかにした。また森田ら⁵²⁾は自動搾乳システムを導入した酪農家の管理作業時間をフリーストール、パーラ搾乳の場合と比較した。干場ら^{26,29,31,32)}は複数の酪農場においてそれぞれの自動搾乳システム牛群の搾乳回数、乳量、搾乳成功率、搾乳能率などを報告している。

1.4 本論文の目的と構成

前節で述べたように、自動搾乳システムに関するこれまでの研究は、搾乳機の自動装着を実現するための技術や乳牛の自発的多回搾乳における問題点の解決が主要な課題とされてきた。近年においては自動搾乳システムにおける利用実態についていくつかの報告もあるが、導入後の運用面において必要とされる搾乳回数あるいは搾乳量の設定などシステムの能率を最大限に発揮させるために牛群の泌乳性など個体特徴を考慮した利用技術に関する提案はまだ成されていない。したがって、今後の自動搾乳システムの普及に際しては、このシステムで搾乳が行われる乳牛の個体特徴や行動特性を把握し、個々の農場の牛群や利用するシステムに最適な運用が得られるように、そのために必要な実践的研究が求められている。

このような背景から、本論文は酪農労働の中で、現在も人的労働に依存する部分が多く、また複雑な作業手順とその対象が生き物であることから自動化が遅れている搾乳作業の完全自動化を実現した自動搾乳システムの運用面に着目した。自動搾乳システムの場合、その搾乳効率に最も影響を及ぼす要因は、搾乳ストールの利用性であると考えられる。定時に搾乳作業が行われる従来の搾乳システムと異なり、自動搾乳システムでは1日中、不定期に任意の乳牛が搾乳ストールを利用することから、搾乳ストールの利用時間は乳牛の乳器形状の不適合により引き起こされる搾乳の失敗、ストールへの進入または退出時における乳牛の遅延行動、乳牛の泌乳量、搾乳速度などの乳牛の泌乳特性により大きく変わり、さらにシステムの洗浄時間やストール内における濃厚飼料の給餌速度も運用に影響を及ぼすと考えられる。本研究はこれらの要因を解析し、自動搾乳システムの最適な利用技術の確立をねらいとする試験研究をまとめたものである。本論文は以下の7章から構成される。

第1章は本章であるが、本研究の背景として酪農における搾乳機械の発達と自動搾乳システムの概要と開発に至るまでの既往研究について述べ、本研究の目的と各章の概要について示す。

第2章は慣行の搾乳方式における搾乳作業者の労働負担量の把握を目標とする。自動搾乳システムは搾乳労働量の軽減を目的の1つとしている。したがって、自動搾乳システムの運用面における評価を考える上で、慣行の搾乳方式に比べ、どの程度労働負担の軽減が成し遂げられるか、また自動搾乳システムにおける搾乳失敗によって生じた人的作業がどの程度の負担量を示すものかを考える必要がある。その評価指標は慣行の搾乳労働負担量を数値化し、搾乳作業における労働負担量を明らかにすることにより得られる。本章ではパイプラインとロータリパーラの2搾乳方式において、搾乳作業姿勢と心拍数や呼吸数の計測を行い、労働負担量の評価値としての可能性を検討する。また、実験室内における搾乳シミュレーションから搾乳作業における労働負担の要因となる作業内容や姿勢についての解析を行い、慣行搾乳システムの労働負担量を明確に示すとともに、自動搾乳システムの労働負担軽減について考察する。

第3章は泌乳牛の乳器形状や4乳頭の配置が個体や産次によってどのように異なるかを明らかにする。自動搾乳システムにおいては乳頭位置検出センサの分解能やティートカップを取り付けるためのマニピレータ自由度の不足から乳頭位置の検出が不能となる場合やティートカップの装着に失敗するケースが生じ、正常な搾乳を成し遂げるために人為的な介助作業が必要となる。ゆえに、これらの個体は作業性を低下させ、システム運用の障害になる。本章では泌乳牛の乳器形状や乳頭座標を調べ、自動搾乳システム導入後においてそれらの乳牛の搾乳成功率から乳牛側の適合性について検証を行う。

第4章は乳牛の乳頭位置、乳頭間隔について、第3章とは異なり泌乳期間の経時的変化や同一個体の産次間変化を2農場の自動搾乳システムから得られる2~3年間の乳頭位置座標データから解析し、システムの運用に及ぼす影響について考察する。また、乳牛の自動搾乳システムの搾乳ストール利用においてストール内への進入あるいはストールからの退出に時間を必要とする乳牛はストール利用率すなわちシステムの能率を低下させる。そこで乳牛の搾乳ストールへの進入、退出時間を計測し、遅延を引き起こす要因を調べ、さらに退出時間の短縮のため音刺激による乳牛退出装置を試作して、その効果について

でも検討する。

第5章は自動搾乳システムにおける3種類のシングル・ボックス型自動搾乳システムの搾乳能率について評価、考察を行う。自動搾乳システムの搾乳能率は24時間不定時搾乳であるため、能率の算出に対して従来とは異なる考え方が必要である。本章では乳牛の搾乳速度、乳量や搾乳回数、搾乳システムの洗浄時間など自動搾乳システムが記録する牛群の泌乳性に関わる項目と各機種の機械的作業時間の計測によりこれらをパラメータとした搾乳能率の数理的モデルを提案する。このモデルを利用することにより、異なる自動搾乳システムの搾乳能率を比較する場合や個々の酪農家で飼養する牛群の泌乳能力に応じた理論搾乳頭数を算出でき、各システムを正しく評価することが可能になる。

第6章は自動搾乳システムの搾乳ストール内における濃厚飼料の給餌速度を乳牛の搾乳速度、給餌量や搾乳量の設定、搾乳前処理作業時間などのパラメータから数理モデル式を作成し、その適合性について実証する。さらに第5章で述べた搾乳能率の数理的モデルを用いて自動搾乳システムを導入した31農場の搾乳記録データを分析し、牛群の泌乳能力や搾乳回数、搾乳回数の設定が異なる農場のシステム稼働率を解析することにより、システム運用において搾乳回数や搾乳頭数がどのように影響されるかを考察する。また、31農場の牛群データから標準モデルを作成し、各農場との比較によって自動搾乳システムの最適な運用について提案する。

さらに、第7章では本研究により得られた成果を総括する。

第2章 慣行搾乳システムにおける作業者の労働負担

2.1 緒言

搾乳牛1頭当りの年間飼養管理作業時間は、省力化によりここ数年減少傾向にはあるが、搾乳作業時間が労働時間全体の中に占める割合は54%と大きく、これは飼養頭数が増えるとともに増大する傾向にある。最近では経営規模の拡大に合わせて飼養形態が繋ぎ飼いからフリーストールへ、また搾乳は省力的作業が可能なミルクングパーラ方式へ移行する酪農家の戸数が増えつつある。さらに2000年度以降、第3の搾乳方式として自動搾乳システムが導入台数を増やしている。

当然、これらの搾乳機器や施設は、作業者にとっても使いやすくかつ労働負担の少ないものであることが望ましい。これまで酪農における労働負担に関

しては、牛舎内作業別の心拍数増加率や作業姿勢を分析した報告が見られる^{1,2,68,70}。これらの研究は畜舎内の作業およびその姿勢を分類し、個々の作業別に心拍数の増加やエネルギー代謝率を求めたもので、搾乳作業時の労働負担と作業姿勢の変化を比較して詳細に解析した研究はまだ成されていない。しかし、最近では角度センサを使用し、姿勢を時系列の数値データとして解析する計測技術が確立してきた⁴²。また従来、労働負担量は心拍数をその指標として利用されてきた⁴³。しかし、心拍数は個人差が大きく、作業者が異なると評価が難しくなることからこれを較正する方法^{35,39,69,74}や心拍数に代わる評価法の試み^{78,82}が成されている。

自動搾乳システムは搾乳労働量の軽減を目的の1つとしている。自動搾乳システムにおける労働負担の軽減やシステム運用上の問題によって生じるストールへの乳牛の追い込みや搾乳機の手動装着など、人的作業の負担量を明確にするためには、慣行搾乳方式の労働負担量の数値化と評価指標の確立が必要と考える。本章ではパイプラインとロータリパーラの2つの搾乳方式において、搾乳作業姿勢と消費エネルギーに換算するための心拍数と呼吸波形の計測を行い、労働負担量の評価値としての可能性を検討した。また、実験室内における搾乳シミュレーションから搾乳作業における負担要因となる作業内容や姿勢についての解析を行い、搾乳作業の省力化や自動搾乳システムの運用に関わる搾乳労働負担について考察した。

2.2 方法

2.2.1 労働負担量の評価法

労働負担の評価値として使用した消費エネルギーは、正確には被験者の酸素摂取量より求められる。本試験では河部ら³⁹)によって示された以下の較正式を使用して被験者の年齢、身長、体重および心拍数から算出し、評価値としてのエネルギー代謝率(RMR: Relative Metabolic Rate)を求めた。

$$E_w = \frac{5}{100a} (HR_w - HR_R) (2.01 - 0.0136A) S_A + E_R \quad (2-1)$$

$$E_R = 1.2 E_B \quad (2-2)$$

$$E_B = \frac{C \cdot S_A}{60} \quad (2-3)$$

$$C = 41.2 - 0.12A \quad (2-4)$$

$$S_A = 0.008883 W^{0.444} \cdot H^{0.666} \quad (2-5)$$

$$RMR = \frac{E_w - E_R}{E_B} \quad (2-6)$$

E_w : 作業時の消費エネルギー [kcal/min]

HR_w : 作業時心拍数 [beat/min]

HR_R : 安静時心拍数 [beat/min]

E_R : 安静時の消費エネルギー [kcal/min]

E_B : 基礎代謝量 [kcal/min]

a : 年齢係数

$$\begin{cases} 1.18 & (20 \leq A \leq 29) \\ 1.14 & (30 \leq A \leq 39) \\ 1.03 & (40 \leq A \leq 49) \\ 0.99 & (50 \leq A) \end{cases}$$

S_A : 体表面積 [m^2]

C : 基礎代謝量基準値 [kcal/ m^2h]

A : 年齢 [year]

W : 体重 [kg]

H : 身長 [cm]

心拍数は個人や日変動により較差が生じるため、基準値としてステップテスト（踏み台昇降試験）時の心拍数を利用する方法が検討されている^{35,74}。これを搾乳シミュレーションと改善された作業方法による実作業試験の前に行い、ステップテスト時の安静時および運動時の心拍数を基に搾乳作業時の心拍数を百分率で求めてステップ較正值として、負担量の評価に利用した。

心拍数の測定にはゴムコーティングされた電極ベルトを被験者の胸部に取り付け、腕時計型のログーにサンプリング間隔5秒で記録するハートレートモニター（POLAR, VANTAGE NV）を使用した。呼吸波形は被験者の鼻孔の下にサーミスタ式の呼吸ピックアップを接着し、多用途テレメータ（NEC 三栄, 511）を介して記録計（NEC 三栄, OMNIACE RT3200）に記録した。呼吸波形を計測する場合は心

拍も胸部に接着した電極からテレメータを介して同時に記録した。2つのデータのサンプリング間隔は20msとし、後に心拍数、呼吸数を記録計の波形データ解析から求めた。

作業姿勢の解析には作業姿勢モニター、マックオクト（VINE, VM8-128）を使用した。この装置は右上腕部、右腋窩下部、右大腿外側、右下腿外側の4箇所角度センサを取り付け、被験者の腰に取り付けたログーにこれらのデータを0.5~1秒毎に記録するものである。計測終了後、ログーからコンピュータにデータを転送し、4箇所の角度データより上腕の上げ角（上腕角度）、腰の曲げ角（腰角度）、膝の屈曲角（膝角度）を計算して求めた。

2.2.2 試験条件と搾乳シミュレーション

始めに搾乳作業時における上腕角度、腰角度、膝角度と呼吸数、消費エネルギーを搾乳方式の異なる農場で計測した。供試農場は繋ぎ飼い・パイプライン搾乳方式の酪農学園大学附属農場の第1および第2牛舎と、フリーストール・ロータリパーラ搾乳方式の酪農学園植苗農場（苫小牧市）の計3箇所、1995年7、9月に試験を実施した。表2-1には試験農場の概要を、また表2-2には計8回の試験条件と6名の被験者（A~F）について示した。各農場の搾乳方式の違いによる労働負担を比較する場合、同一被験者による計測が望ましいが、本試験では作業能率の計測や不慣れた作業環境でのストレスを考慮し、被験者は各々の農場での熟練作業者を対象とした。なお、被験者は全て男性で、年齢は20~61歳であった。

計測はすべて夕方の搾乳時に行い、搾乳作業は被

表 2-1 試験農場の概要

農場名	搾乳頭数	作業者数	搾乳方式	形式・大きさ	ユニット数
附属農場第1	32	2~3	パイプライン	対尻式	4
第2	28	2~3	パイプライン	対尻式	4
植苗農場	65	2	ロータリパーラ	12頭ヘリンボーン	12

表 2-2 試験条件と被験者

Test No.	試験日	試験農場	搾乳時刻	処理頭数	被験者	年齢	身長[cm]	体重[kg]
No.1	7月12日	附属農場第2	16:18~16:52	12	A	25	172	70
No.2	7月13日	附属農場第2	16:12~16:47	15	A	25	172	70
No.3	7月14日	附属農場第1	15:59~16:40	13	B	43	175	64
No.4	7月17日	附属農場第1	16:05~16:37	14	C	20	165	67
No.5	7月18日	植苗農場	15:46~16:41	60	D	61	160	69
No.6	7月19日	植苗農場	15:42~16:41	65	E	57	155	52
No.7	7月24日	附属農場第1	16:05~16:44	16	F	24	170	67
No.8	9月16日	附属農場第1	16:13~16:42	10	C	20	165	67

験者による最初の乳牛へのユニット装着から最後の乳牛のユニット取り外しまでと定義して、その間の作業姿勢、労働負担量を計測した。また、被験者は作業の前後に5分間椅子に掛け、心拍数、呼吸数の安静時と作業後のデータを計測した。

搾乳作業中は被験者の作業内容を後で解析できるようにビデオカメラで記録し、これを基に作業内容別の時間分析を行った。繋ぎ飼い・パイプライン搾乳の作業内容は移動、前処理（乳頭清拭、前搾り）、ユニット取り付け、取り外し、ディッピング、ユニット移動、直立静止、その他の8項目に、パーラ搾乳ではユニット移動を除く7項目に分類した。

図2-1、2-2にそれぞれパイプライン方式、ロータリパーラ方式での被験者の代表的作業姿勢を示した。ロータリパーラでの乳頭清拭、前搾り、ユニット取り付け作業と取り外し、ディッピング作業は2名の組作業で行われていたので、それぞれの作業者について計測を実施した。

次に作業内容と労働負担の関係をより明確に解析するため、酪農学園大学農業機械実習室に設置されたパイプラインシステムを使用して、単位時間に同一の作業を繰り返す模擬搾乳作業（搾乳シミュレーション）を行い、心拍数と作業姿勢を計測した。この試験では、以下に示す個々の作業内容と時間をあらかじめ決めた4つの搾乳モデルを仮想し、これら

の労働負担量を比較した。

- (1) Control モデル：パイプライン搾乳
- (2) Cart モデル：運搬車の高さを改善
- (3) ACR モデル：Control モデルに自動離脱装置を付加
- (4) Parlor モデル：パーラ搾乳

Cart モデルでは乳頭清拭用タオルを入れたバケツを置く運搬車の荷台高さを床面15 cmから67 cmに変えて作業姿勢の改善を試みた。また、Parlor モデルは片側6頭のヘリンボーン型でピット深さが75 cmと仮定して模擬乳房を配置し試験を行った。

各モデルの作業内容と時間は前述の実搾乳作業におけるビデオカメラの記録から算出した(表2-3)。被験者はタイムテーブルに従い搾乳シミュレーションを行った。Parlor モデルを除く(1)~(3)のモデルでは個々の作業の間に5秒程度の歩行が含まれるよう模擬乳房から運搬車までの距離を決めて配置した。これらのモデルでは、1頭分の作業を13回反復した。また、Parlor モデルでは、6頭分の連続作業の後、直立静止（休憩）を挟んで5回反復した。被験者は19歳から22歳の搾乳作業に熟達した男子で、最初に22歳の男子2名(G, H)により、前述の(1)~(4)の4つの搾乳モデルについて搾乳シミュレーションを実施し、次に自動離脱装置が搾乳労働負担に及ぼす影響を詳細に調べるため、ControlとACR



図 2-1 被験者の作業姿勢
(パイプライン)

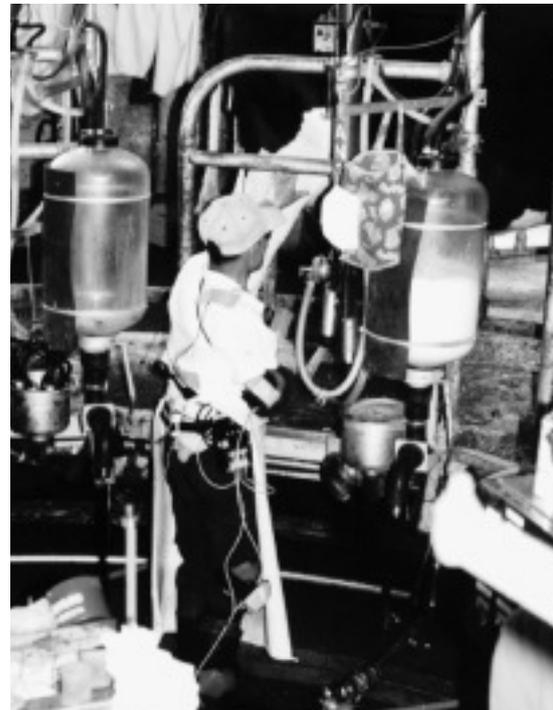


図 2-2 被験者の作業姿勢
(ロータリパーラ、取り外し作業者)

表 2-3 搾乳モデルと作業内容および処理時間

搾乳モデル	作 業 処 理 時 間 [s]							反復処理 [回]	計測時間 [min]	
	前搾り	洗浄	拭き取り	ユニット取付	直立静止	取り外し	ディッピング			ユニット移動
Control, Cart	8	8	8	13	27	14	5	9	13	32.38
ACR	8	8	8	13	27	—	5	9	13	27.18
	※休憩を除く各処理の前後に5秒間の移動を行う							※ユニット移動は隔回で行う		
Parlor	4	4	4	12	126	4	3	—	5	26.00
	※前搾り～ユニット取付までを6回反復、休憩の後、取り外し～ディッピングを6回反復で1サイクル処理とする									
	※移動は含まない									

の搾乳モデルについてさらに19才の男子10名（I～R）による搾乳シミュレーションを実施した。

2.3 結果および考察

2.3.1 搾乳方式と労働負担量

図2-3はサーミスタ式の呼吸ピックアップで得られた波形データから10秒毎に呼吸数を求め、パイプライン方式における搾乳作業時（1200～1800秒、Test No. 2）の被験者心拍数から算出した消費エネルギーと比較した。作業中の呼吸数は作業中毎分12～54回まで変動した。消費エネルギーと呼吸数は極めてよく似た変化を示し、搾乳作業全体で $r=0.78$ と相関が認められた。しかし、呼吸数は回復が早く作業後の上昇もあまり認められなかった。また、呼吸数は10秒当りの回数が少ないので会話や口での呼吸などの影響を受けやすく、さらに消費エネルギーが作業時間の経過とともに次第に増加するような場合で一致しない箇所も生じた。したがって、呼吸数では労働負担の評価値として利用することは難しいが、作業時における労働負担の増減を推察することは可能と考える。

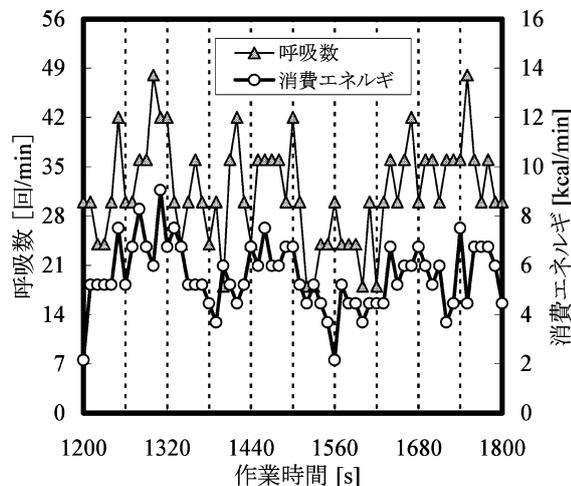


図 2-3 作業開始から1200～1800秒の呼吸数と消費エネルギー（パイプライン）

作業姿勢については、掌を両股につけた直立姿勢を基準として、この時の膝角度を180度、腰角度、上腕角度を0度として表した。図2-4にはパイプライン方式（Test No. 1）において被験者の膝、腰、上腕の各部位の角度変化と作業内容、消費エネルギーの結果の一部を示した。パイプライン方式における作業者の姿勢には次のような特徴が認められた。

- (1) 乳頭清拭や前搾りの前処理作業およびユニットの取り付け、取り外し作業の際に乳牛の傍らでしゃがみ、膝角度を40～50度に曲げる姿勢
- (2) 前搾りのためのストリップカップやタオルを通路上の運搬車から取る時に腰角度を40度程度に屈曲させる姿勢
- (3) ミルクタップにユニットを装着する際に上腕角度を90度以上振り上げる姿勢

消費エネルギーは膝の屈曲作業後に増加し、搾乳の観察、休息時に減少する変化を繰り返した。

図2-5はロータリパーラ（Test No. 5）において前処理、ユニット取り付けを行った作業者の姿勢と消費エネルギーの結果の一部を示した。ロータリパーラ方式での作業者の姿勢の特徴としては、搾乳作業中の膝角度、腰角度に大きな変化がなく、ピット内作業のほとんどは直立姿勢であった。しかし、腰より上方での作業が多いため、上腕を50度以上に上げる頻度はパイプライン方式よりも多いことが観察された。また、ロータリパーラでユニット取り外し、ディッピング作業を行う作業者の直立姿勢からの変化は、ユニット取り付け作業よりもさらに少なかった。なお、この時ユニットの取り外しは83%が自動離脱により行われたため、作業中の消費エネルギーの変動は取り付け作業と同様にわずかしか認められなかった。

図2-6、2-7はパイプライン方式（Test No. 2）とロータリパーラ方式のユニット取り付け（Test No. 5）、取り外し（Test No. 6）作業者の膝と上腕の角度について出現頻度の割合を示した。パーラ方式において取り付け、取り外し双方の作業員について膝

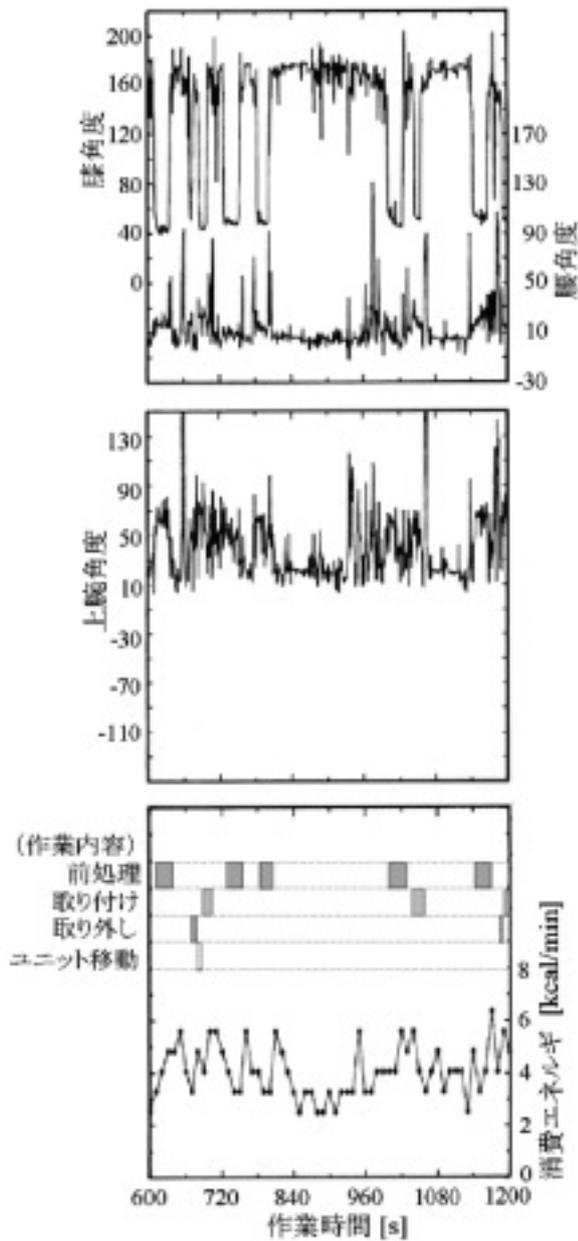


図 2-4 作業姿勢と消費エネルギー (パイプライン)

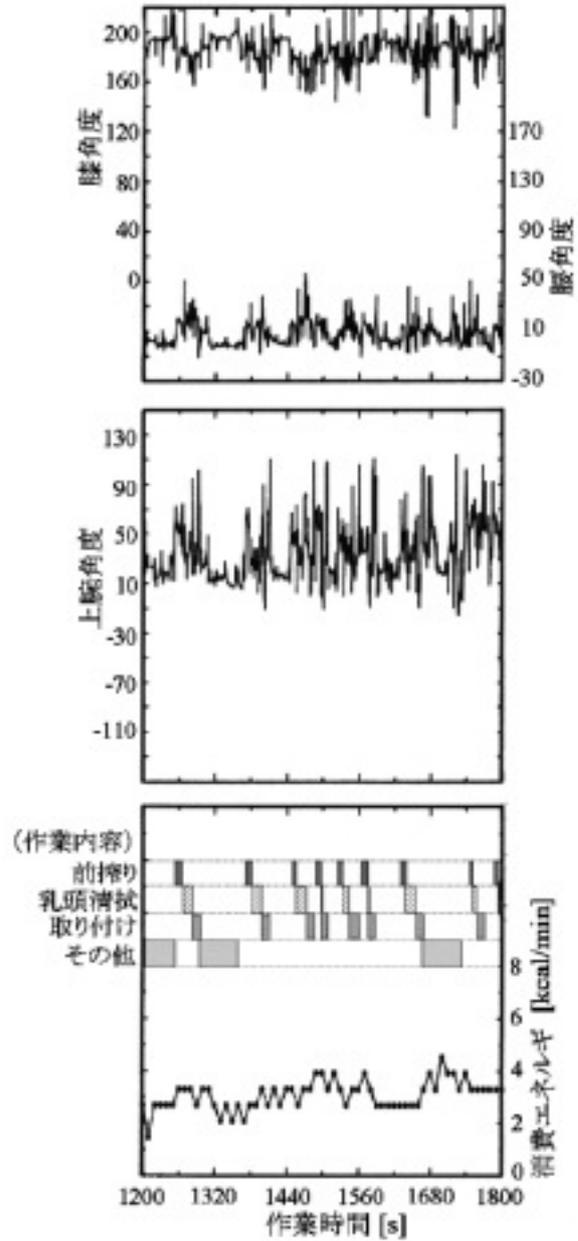


図 2-5 作業姿勢と消費エネルギー (ロータリパーラ, ユニット取り付け作業)

角度の分布は、全体の約 80%が直立姿勢の膝角度である 170~190 度の範囲に示された。一方、パイプライン方式においては直立時の 180 度の他、膝角度 60 度に乳牛の傍らでの蹲踞（そんきょ）姿勢と思われるピーク（17%）が認められた。

上腕角度はパイプライン、パーラ方式のどちらも全体の 36~52%が腕を下ろした 0~20 度の範囲において示され、20~60 度まではほぼ一定に 10%程度の出現が認められた。パーラでのユニット取り付け作業の場合、上腕を 100 度以上上げる割合は約 5%あり、図 2-5 からこれが乳頭へのユニット取り

付け作業時に出現していることが分かる。また、消費エネルギーもわずかではあるがユニット取り付け時に増加する傾向が認められた。供試農場のパーラのピット深さは 75 cm であったが、これらのことから被験者の身長に合わせた深さの調節が必要と考える。

図 2-8 は作業開始から終了までの消費エネルギー（移動平均項数 7）の変化を示した。パイプライン方式（Test No. 1, 2）では、作業内容によっておよそ 4 kcal/min の幅で増減を繰り返しながら、作業の経過とともに消費エネルギーが次第に上昇する傾向が

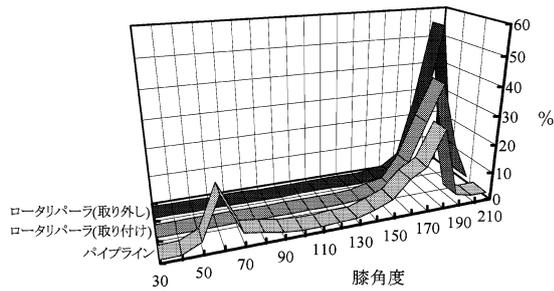


図 2-6 作業時の膝角度の度数割合

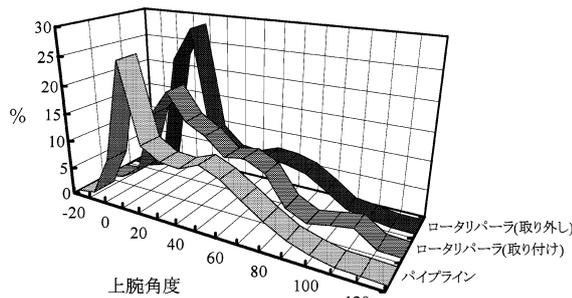


図 2-7 作業時の上腕角度の度数割合

認められた。しかし、ロータリパーラ方式 (Test No. 5, 6) では取り付け、取り外し双方の作業者の場合、長い作業時間であるにも関わらず、作業中はほぼ一定もしくは若干減少する傾向に消費エネルギーが推移した。また、作業中の増減幅も約 2 kcal/min とパイプライン方式に比べると小さかった。この原因を調べるため、作業時間全体に占める作業内容毎に合計時間の割合を求めた (図 2-9)。その結果、前処理、取り付け、取り外し、ディッピングなどの作業時間の割合には、搾乳方式による差は認められなかった。しかし、移動、直立静止の時間割合に差が生じ、繋ぎ飼い牛舎 (附属農場) でのパイプライン搾乳では移動すなわち歩行時間が 38~39% を占め、パーラ搾乳の 12% に比べて大きく、逆に直立静止の時間はロータリパーラでは 42% とパイプライン搾乳のほぼ 2 倍となった。繋ぎ飼い牛舎では牛床上から尿溝をまたぎ、通路への往復移動が多く、それに反してロータリパーラでは移動に分類される歩行が特に少なく、取り付け作業者の場合所定の位置から 1m 以上移動することは稀であった。このことから、繋ぎ飼い牛舎での搾乳作業はユニットの取り付け、取り外し時の蹲踞から直立へと姿勢が大きく変化した際に労働負担が大きく、さらにその後の歩行が回復を阻害すると考える。

表 2-4 には各農場における被験者が搾乳した頭数から算出した作業能率、RMR、心拍数増加率などの結果を示した。No. 5, 6 の作業能率はロータリパー

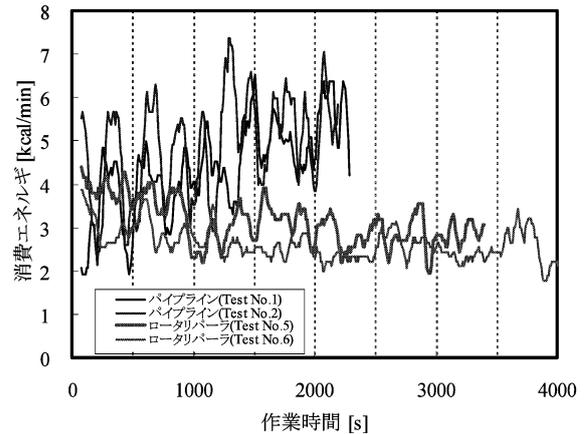


図 2-8 消費エネルギー (作業開始~終了)

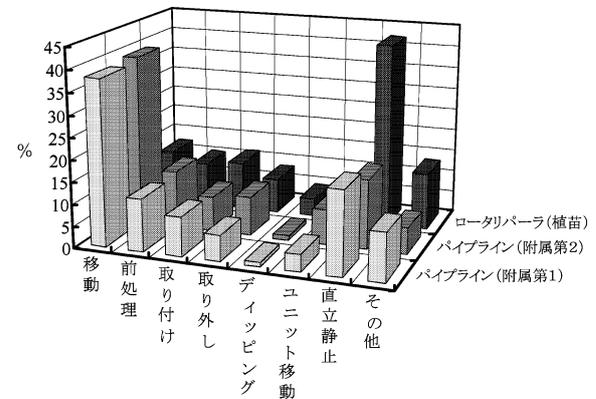


図 2-9 作業内容別の時間割合

ラにおける 2 名の組作業を 1 人あたりに換算して示した。繋ぎ飼いの附属農場における作業能率は 1 人 1 時間当たり平均 23 頭とロータリパーラの 33 頭に比べると低い値ではあるがパイプライン方式では平均的な数値と言える。

RMR、心拍数増加率はそれぞれパイプライン方式が 4.7~6.7, 53.8~90.9% とパーラ方式の 3.5~3.8, 17.2~40.7% に比べ高い値を示した。またロータリパーラにおける取り付け、取り外しの作業別では、自動離脱装置があるため取り外し作業 (Test No. 6) の消費エネルギー最大値、心拍数増加率が若干低くなった。作業中の呼吸数の最大値は毎分 42~54 回と大きな差はなく、搾乳方式による違いは認められなかった。

以上の結果から、姿勢変化の大きいパイプライン方式では消費エネルギーの変動が激しく、歩行が多いため作業の経過とともに次第に消費エネルギーが増加した。逆に姿勢変化や歩行が少ないロータリパーラ方式では消費エネルギーは一定に推移したことから作業者の労働負担も少なかった。労働負担量としての

呼吸数は2つの搾乳方式で差が認められず、評価指標としての利用は難しいと思われた。しかし、被験者の身体データと作業時の心拍数計測値から算出した消費エネルギーは、搾乳労働負担の評価指標として十分に利用可能であると考えられる。さらに測定の際の日較差を較正する方法を取り入れることにより、一層正確な労働負担量の評価が可能になると考える。

2.3.2 シミュレーションによる搾乳労働負担量

搾乳シミュレーションでは同一被験者による各搾乳モデルの負担量を比較することが可能であるため、消費エネルギーに換算することなく心拍数を評価値として利用することにした。しかし、被験者の日較差を考慮してステップテストに基づく較正值も算出した。

図2-10には各搾乳モデルにおける被験者Gの作業時心拍数の変化を示した。破線はパーラを除くモデルで1頭分の搾乳作業の区切りを、パーラでは6頭分の処理の区切りを示した。パイプライン搾乳のControl, Cart, ACRの各モデルにおいて、心拍数は1頭分毎の前処理、ユニット取り付けなどの作業内容に応じて増減を繰り返し、負担量に差が認められた。自動離脱装置を使用したACRモデルの場合、心拍数の変動は小さくなったが、運搬車荷台高さを改善したCartモデルではあまり差が認められなかった。パーラ処理を想定したモデルでは増減はさらに少なく、心拍数は全体にほぼ90 beat/min以下であった。同様の傾向が被験者Bの場合にも認められた。

表2-5には各搾乳モデルにおける被験者G, Hの作業中の最大心拍数, RMR, 心拍数増加率およびステップ較正值を示した。各々の搾乳モデル毎に実験日が異なるため、ステップテスト前の安静時心拍数は被験者Gの場合で63~74 beat/minまで差が生じ、同一被験者でも試験時の心拍数計測値に日較差の影響が認められた。したがって、これを較正するためにステップテスト運動時を100%としたステップ較正值を求め、作業時の較正值平均と最大を示し

比較した。その結果、Control, Cart, ACRモデルともに搾乳シミュレーション時のステップ較正值の平均は47~48%と大差なくなった。しかし、ステップ較正值の最大はControl, Cartモデルの96%に比べACRモデルが82%と小さくなり、労働負担が若干少ないことを示した。Parlorモデルではステップ較正值平均が34%, 最大値でも66%と他の搾乳モデルよりも負担量が少ないことを示した。被験者Hの場合もParlorモデルに関しては、同様に他の搾乳モデルより負担量が少なく、さらにCartモデルでは心拍数増加率, 較正值平均, RMRがControlモデルと比較して小さな値を示した。被験者Hは身長が190 cmと被験者Gよりも15 cm高く、運搬車の荷

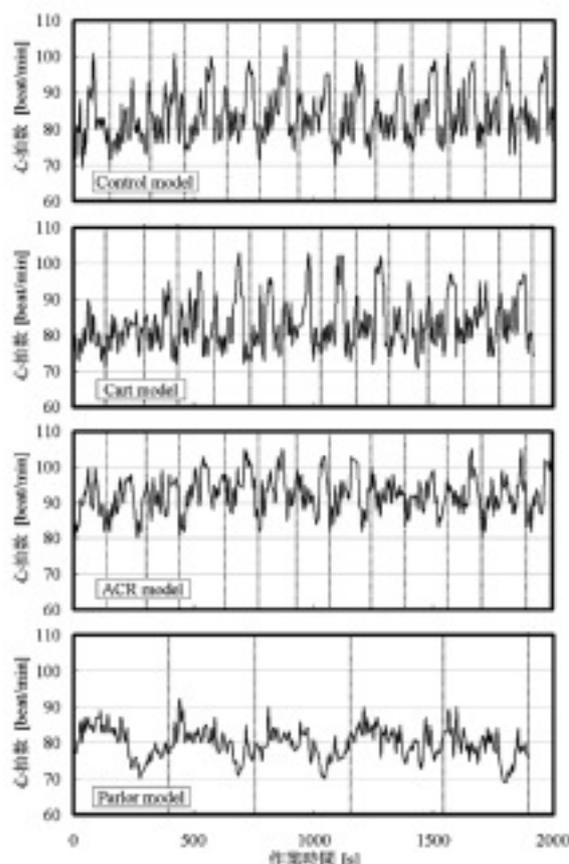


図2-10 各搾乳モデルの心拍数変化(被験者G)

表2-4 各搾乳方式の作業能率, エネルギー代謝率, 心拍数

搾乳方式	Test No.	作業能率 [頭/hr・人]	消費エネルギー 最大値[kcal/min]	エネルギー代謝率 RMR	心拍数[beat/min]			呼吸数[回/min]	
					安静時	作業時(max)	作業後	増加率[%]	作業時(max)
パイプライン (附属第2)	No.1	21.2	7.13	5.00	69	114	72	65.2	48
	No.2	25.7	9.05	6.67	66	126	72	90.9	54
パイプライン (附属第1)	No.3	19.0	6.37	4.84	72	114	78	58.3	42
	No.7	24.6	6.61	4.69	78	120	72	53.8	42
ロータリパーラ (植苗農場)	No.5	32.8	4.52	3.48	81	114	84	40.7	54
	No.6	33.1	4.30	3.89	87	102	66	17.2	42

台高さの改善効果が認められたと考える。

図 2-11 には姿勢モニタによる被験者 G の膝角度の度数割合を搾乳モデル別に示した。膝角度の割合は Parlor モデルの場合、直立姿勢である 180 度前後が 60% 程度と最も多かった。また、ACR モデルでは自動離脱装置の使用により 90 度以下に膝を曲げる蹲踞の姿勢が 28% と Parlor を除く他のモデルの 34.3, 34.5% よりわずかに少なくなった。

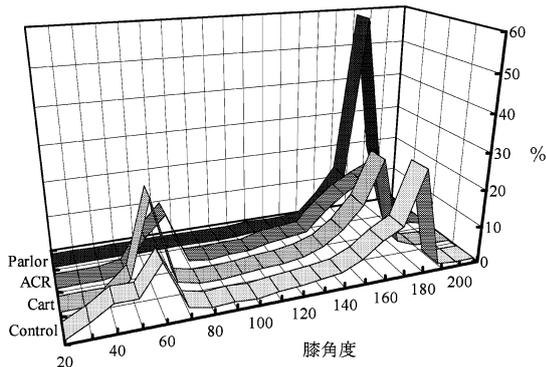


図 2-11 膝角度の度数割合 (被験者 G)

図 2-12, 2-13 には同様に被験者 G の腰角度と上腕角度の度数割合を示した。腰角度は直立姿勢時の 0 度付近が最も多いが、運搬車からタオルを取る場合などに 40 度以上に腰を屈める姿勢が認められ、Cart モデルにおいて屈曲角 40 度以上の割合は 37.7% と Control, ACR モデルの 40.4, 40.2% と比べわずかに改善の効果が認められた。上腕角度もまた直立姿勢時である 0 度付近が最も多いが、Parlor モデルでは 30 度以上に腕を上げる姿勢が 33.1% と、3 つのパイプラインモデルの 15.4~18.3% と比べ、大きな割合を示した。以上の結果は被験者 H についても同様であった。

作業内容と負担量の関係調べるため、10 名の被験者 (I ~ R) について Control と ACR モデルの心拍数の変化を詳細に解析した。図 2-14 は被験者 O の搾乳シミュレーションで 13 回反復処理した内、作業の中にユニット移動がない場合の心拍数変化を平均化して示し、図 2-15 にはユニット移動がある場合の結果を示した。また、図にはそれぞれの搾乳モデルにおける心拍数計測時の姿勢を付け加えた。

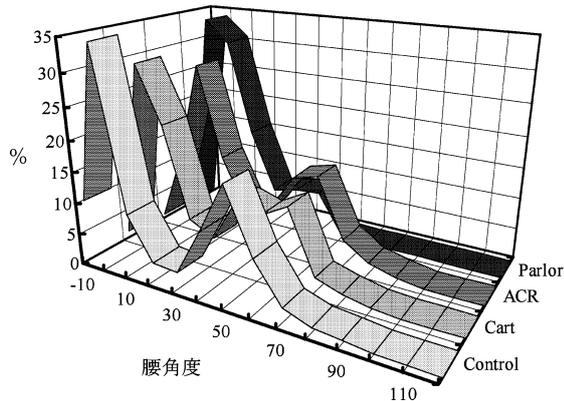


図 2-12 腰角度の度数割合 (被験者 G)

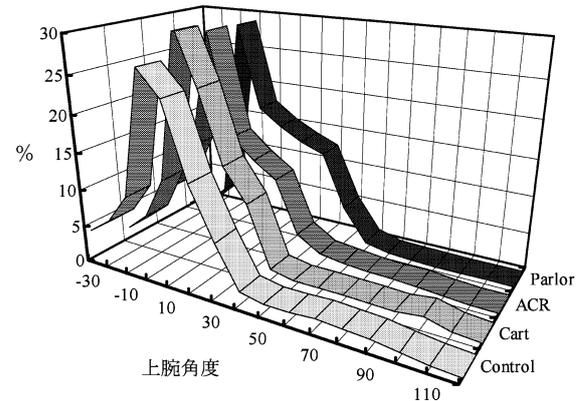


図 2-13 上腕角度の度数割合 (被験者 G)

表 2-5 各搾乳モデルのエネルギー代謝率, 心拍数増加率とステップ較正值

被験者		搾 乳 モ デ ル			
		Control	Cart	ACR	Parlor
G	安静時	65	63	74	67
	心拍数[beat/min] 作業時(max)	103	103	105	92
	増加率[%]	58.0	63.0	41.1	37.1
	ステップ較正值[%] 最大値	96	96	82	66
	平均値	47	48	48	34
	エネルギー代謝率(RMR)	4.26	4.49	3.45	2.81
H	安静時	73	88	79	80
	心拍数[beat/min] 作業時(max)	120	131	120	111
	増加率[%]	64.4	48.4	52.3	38.9
	ステップ較正值[%] 最大値	90	95	91	71
	平均値	52	38	47	40
	エネルギー代謝率(RMR)	5.30	4.82	4.65	3.51

作業にユニット移動がない場合(図2-14), 心拍数は Control, ACR の搾乳モデルともに 10 秒目に 120 beat/min を超えた。これは前サイクル最後の作業であるユニット移動によるものと考える。図に示した作業内容と姿勢から判断して, 蹲踞の姿勢で行う各々の作業との間には 10~15 秒のずれはあるものの心拍数の変動はこれらと一致した。

心拍数は前搾りや乳頭清拭などの前処理作業の度に増減を繰り返し, ピーク値も次第に高くなった。ユニットの取り付け作業の際に心拍数は更に高くなり, また高い値のまましばらく経過した。ユニット

の取り付けは蹲踞の姿勢のまま, ユニットの両手で保持しながら乳頭への取り付けを行うため, 他の作業より時間も長く負担量も大きいと考える。その後, 直立静止(休憩)によって心拍数は減少したがユニットの取り外し作業後に再び増加した。ACR モデルでは取り外しの作業はないがユニットの所定位置への戻しおよび自動離脱装置の復帰作業などによりわずかな増加が認められた。

ディッピング作業による心拍数の変化は次の処理サイクルの最初に生じた(図2-15)。その後の変化は先に述べた図2-14のユニット移動がない場合と同

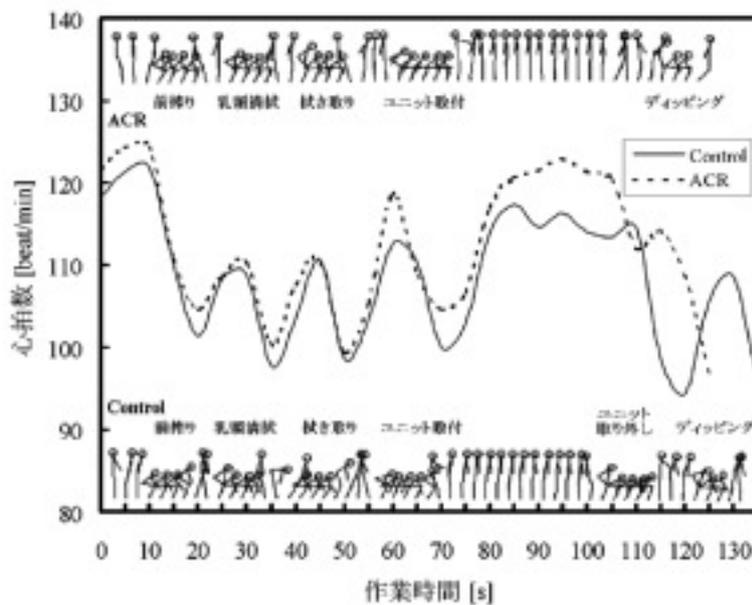


図 2-14 作業内容と心拍数変化 (ユニット移動のない場合)

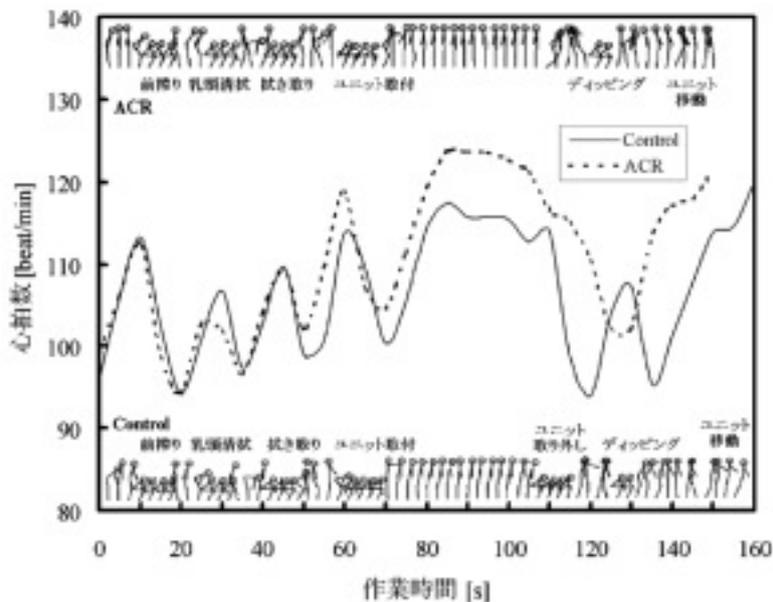


図 2-15 作業内容と心拍数変化 (ユニット移動のある場合)

様であるが、Control モデルではユニット取り外し作業で増加した後一旦減少した心拍数は、ディッピング作業とそれに続くユニットの移動によって増加を続け、ユニットの取り付け作業時とほぼ同じ心拍数（図 2-14 の最初の部分）まで上昇した。

被験者 O の結果では ACR モデルの心拍数は Control モデルに比べ高い値であるように思われた。そこで被験者 I ~ R の 10 名の Control, ACR モデルにおける心拍数およびステップ較正值を求めた（表 2-6）。自動離脱装置のない Control モデルでは、作業中の心拍数の最大値および平均値は 120, 100 beat/min, 自動離脱装置のある ACR モデルでは 118, 100 beat/min と最大値においてわずかに減少した。またステップテストの較正值においても最大値が 6 % 程度減少した。しかし、被験者 O の結果が示すように個人差があり、統計学的にも両者の間に有為な差は認められなかった。

表 2-7 には搾乳シミュレーションの中でユニット移動を行った場合と行わない場合の心拍数の違いを示した。Control および ACR モデルのどちらの場合もユニット移動を行った場合に心拍数が 14~17 beat/min 程大きく、ユニット移動の有無による心拍数には有為な差 ($P < 0.05$) が認められた。

以上のことから、自動離脱装置を使用した ACR モデルでは、心拍数、ステップ較正值がわずかに減少したが有為な差は認められず、作業者の負担量軽減を目的とした場合に自動離脱装置の効果は余り期待できない。しかし、ユニットの移動が作業者に与える負担は明白であり、繋ぎ飼いで搾乳作業において懸架式ミルカの利用や第 1 章で述べた八谷ら¹⁷⁾による繋ぎ飼用搾乳ロボットの研究がこれらの労働負担を改善することにに関して有効な方法であると

言える。

これまでに述べた試験は自動搾乳システムの労働負担量を直接的に計測したものではなかったが、森田ら⁵²⁾が調査した自動搾乳システムの管理作業時間から自動搾乳システムにおける労働負担量を推論することができる。森田らの報告によると、自動搾乳システムの 1 日 1 頭当たりの作業時間は慣行のパーラ方式の半分以下となり、さらに搾乳、乳牛の移動、搾乳機器の洗浄などの内訳別では、乳牛 1 頭あたりの搾乳作業時間はパーラ方式が 199 秒、自動搾乳システムでは乳頭位置検出が不能で介助による搾乳機の取り付けが必要だった乳牛の 7 秒へと大幅に減少した。同様に搾乳機器の洗浄作業時間は 48 秒から 25 秒へと減少した。しかし、一方で自動搾乳システムにおいて長時間未搾乳である乳牛を搾乳ストールへと移動させるために要した時間はパーラ舎へ乳牛を移動させる場合よりも多く、67 秒が必要であったと報告している。本章の結果から、パーラ搾乳方式では作業者の姿勢変化や移動などの歩行がほとんど無いことが労働負担の少ない理由と考えられた。自動搾乳システムの作業時間はパーラ方式の半分以下で、その作業内容も姿勢変化を伴わないので、自動搾乳システムの導入による労働負担の軽減が大いに期待できる。しかし、牛群内に未搾乳牛が増えた場合、乳牛の移動や追い込み作業の時間が増加してパーラ方式よりも大きな労働負担が生じることも予想される。したがって、自動搾乳システムの効率的な運用を考えた場合、このような人的作業を要する未搾乳牛や乳頭位置の検出に失敗する乳牛に関しては、さらに原因の解明が必要である。

2.4 摘要

パイプラインとロータリパーラにおける搾乳作業時の作業姿勢と心拍数、呼吸数から労働負担の評価を試みた。さらに実験室内のパイプラインミルカにより 4 つの搾乳モデルで搾乳シミュレーションを行い、パイプライン搾乳における労働負担の要因となる作業内容や姿勢について明らかにした。その結果、以下の結論を得た。

1) パイプライン方式における作業者の姿勢は前

表 2-6 Control, ACR モデルの労働負担量

	心拍数[beat/min]		ステップ較正值[%]	
	最大値	平均値	最大値	平均値
Controlモデル (標準偏差)	120 (13)	100 (10)	97 (16)	54 (11)
ACRモデル (標準偏差)	118 (12)	100 (11)	91 (19)	53 (17)

表 2-7 ユニット移動直後の労働負担量

	心拍数[beat/min]			
	Controlモデル	(標準偏差)	ACRモデル	(標準偏差)
ユニット移動なし	93 ^a	(10)	92 ^b	(11)
あり	109 ^a	(13)	106 ^b	(12)

a: $P < 0.01$, b: $P < 0.05$

処理とユニットの取り付け、取り外し時に 40~50 度の膝の曲げ、前搾りのストリップカップやタオルを運搬車から取る時に 40 度の腰の屈曲、ミルクタップ装着時に 90 度以上の上腕の振り上げなどにその特徴が認められた。一方、パーラ方式では膝、腰の角度に大きな変化はないが取り付け作業の上腕を 50 度以上に上げる頻度はパイプライン方式よりも多いことが観察された。

2) 心拍数より算出したパーラ搾乳の消費エネルギーの変化はパイプライン方式に比べ少なかった。RMR、心拍数増加率はそれぞれパイプライン方式が平均 5.3, 67.1%とパーラ方式の平均 3.7, 29.0%に比べ高く、またパイプライン方式は作業中に消費エネルギーの上下変動があり、作業の経過とともに次第に消費エネルギーが増加することから労働負担は大きいと考える。

3) 搾乳シミュレーションにおいて被験者の個人差、日変動を考慮したステップ較正值の最大値は Control, Cart モデルに比べ ACR モデルが小さくなり、労働負担が若干少ないことを示した。Parlor モデルでは較正值平均 34, 最大値 66 と他の搾乳モデルよりも負担量が少ないことを示した。

4) ACR モデルにおいて自動離脱の使用により 90 度以下に膝を曲げる作業姿勢は Parlor を除く他の 2 つのモデルより 6%程度少なくなった。また、腰角度は Cart モデルにおいて 40 度以上曲げる割合がわずかに減少した。

5) Control および ACR モデルの両方とも、ユニット移動を行った直後の心拍数は大きく、ユニットの移動による負担量に有為な差 ($P < 0.05$) が認められた。

第 3 章 乳牛の乳器形状と自動搾乳システムへの適合性

3.1 緒言

自動搾乳システムにおける最大の長所は、毎日 3~4 時間を必要としていた搾乳作業の労働量が大幅に軽減されたことである。その一方で、搾乳が乳牛の自発的行動に依存することから、活動性の低下により搾乳ストールを訪れない未搾乳牛や⁶⁷⁾、また何らかの原因で搾乳シーケンスが正常に終了できなかった搾乳失敗牛が発生することがある。これらの個体により作業による搾乳ストールへの追い込み作業や搾乳機装着のために人為的な介助作業が必要になり、労働負担の軽減という自動搾乳システムの優位性が損なわれることは第 2 章でも述べた。しかも自動搾乳システムの搾乳能率は 6~8 頭/時と低

いため³⁰⁾、これらの個体が数頭でも存在した場合、余分な作業時間は作業者にとって大きな負担となる。したがって自動搾乳システムを効率的に運用するためには、未搾乳牛や搾乳失敗牛はできるだけ少ないか、または牛群に含まれないことが望ましい。

搾乳シーケンスが失敗となって終了する原因には、搾乳機器の故障や不具合など機械に起因する場合と、特殊な乳牛の乳器形状により乳頭位置の検出や搾乳機の装着に失敗する場合がある。前者は機器の修理や交換によって原因が容易に解消される。しかし、後者の乳器形状については自動搾乳システムでの搾乳が行われる前に除外することにより、その後の搾乳能率に大きく影響すると言われている²⁸⁾。しかし、乳牛の乳器形状が個体によって異なり、またその乳器形状は分娩後や泌乳期によって変化することから⁷⁶⁾、その発生を皆無にすることは困難を要する。したがって産次や乳量また泌乳期間における乳器形状や乳頭位置の変化を把握することは、装着失敗の原因を明確にし、乳頭検出方法やマニピュレータの改良、システムの搾乳能率の改善に有用である。

乳頭位置検出のためや搾乳ロボットの開発を目的としたマニピュレータの設計のため、これまでに乳牛の乳頭座標の研究^{15,50)}が行われた。本章では、繋ぎ飼い・パイプライン搾乳方式からフリーストール・パーラ方式への移行と同時に自動搾乳システムの導入も予定されていた農場において、乳牛の乳器形状や乳頭座標を測定して、各個体の搾乳ロボットへの適合性を調べた。さらに導入後の乳牛の搾乳成功率からこれらの適合性を検証するとともに、搾乳失敗の原因を究明した。

3.2 方法

第 1 章で述べたように搾乳ロボットは搾乳ストールの大きさや搾乳機を装着するマニピュレータの動作範囲から、ほとんどの機種において搾乳可能な乳牛の体長、体幅、乳頭間隔、最低地上高などの条件が定められている(表 1-1)。そこで L 社自動搾乳システムの導入が予定されていた酪農学園大学附属農場(以下、附属農場)において、これに適合する乳牛を選定するため、自動搾乳システム移行前の乳牛の乳器形状および乳頭座標の測定を実施した(図 3-1)。頭数は測定時に乾乳中であつた個体を除く同農場第 1 および第 2 牛舎のホルスタイン種、ジャージー種を合わせた 69 頭であつた。測定項目は各乳頭間距離、先端高さ、付着角度、乳房の大きさ、体長、体幅などで、これらをデジタルコンベックス、スラ

ントルール、体格測定器などを用いて測定した。図3-2には乳牛各部の測定箇所を示した。乳房の大きさは乳房の付着点から後乳房端までの縦幅と後乳房幅を測定し、体長はき甲から座骨までを測定した。測定は搾乳による乳房形状、乳頭間隔の変化を調べるため、午後の搾乳直前と直後に、さらに泌乳期間の推移による影響を調べるため、2000年7月28日、8月28日、10月15日の計3回実施した。また、測定した項目の他に乳牛個体データとして乳量、産次、分娩後日数などを記録した。これらのデータから産次の違いや搾乳による乳頭間隔への影響と各個体のL社搾乳ロボットとの適合性を調べた。

乳牛の適合性を調べるにあたり、導入予定の附属農場と同機種を既に導入している3農場（A、B、C）から個体管理ソフトウェアのバックアップデータを採取し、これらのホルスタイン牛（合計188頭）の搾乳および乳頭座標データを解析して、乳頭間隔などから算出した実際条件とL社が導入に際して提示している推奨条件の2つで附属農場の個体データと比較し、適合性と不適合割合を求めた。



図3-1 乳牛各部位の測定風景

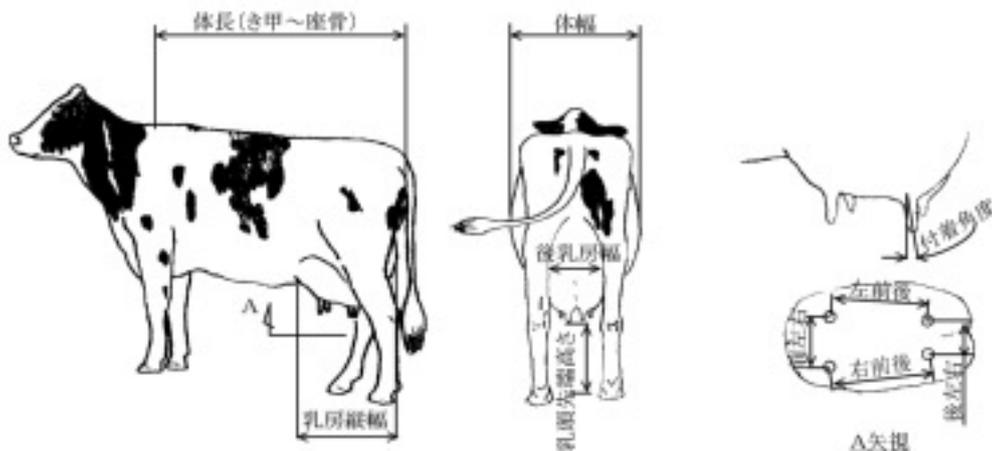


図3-2 乳牛各部の測定箇所

2000年11月6日以降は、適合性を比較した個体の中から19頭を選抜し、自動搾乳システム牛舎(図3-3)において自動搾乳を開始した。牛舎はワンウェイ通路を2ヶ所に設定した単方向移動型レイアウトである。なお、飼槽側8つのストールは全て塞ぎ、休息と採食場所を完全分離した。移行後1週目から19週目までの各個体の全搾乳回数と搾乳失敗回数から搾乳成功率を求め、自動搾乳システムによって計測された乳頭座標データと移行前に判定した適合性を比較、検証した。また、搾乳の失敗が多い個体については、その原因についての検討を行った。

3.3 結果および考察

3.3.1 自動搾乳システムを導入した農場の牛群乳頭間隔

自動搾乳システムを導入したA、B、Cの3農場から個体管理ソフトウェアが記録したデータを基に、乳牛の4乳頭位置の分布を図3-4に示し、表3-1には乳頭間隔、最低乳頭高さ、泌乳日数、搾乳量、搾乳間隔などを初産、2産、3産以上の産次別にまとめた。搾乳ロボット座標系のX座標原点は搾乳ストールの中心軸で、Y座標原点はストール前方にある。3農場の4乳頭位置の分布は、X座標でおよそ300 mm、Y座標でおよそ400 mmの範囲にあった。乳牛の平均乳頭間隔は、産次が進むと前後の間隔については増加し、産次間に有意な差($P < 0.01$)が認められた。しかし、左右の間隔については後ろ左右間に微増が認められたものの、前左右間は逆に減少傾向であった。最低乳頭高さは産次が進むと減少し、産次間に有意な差($P < 0.01$)が認められた。八谷ら¹⁵⁾やMillerら⁵⁰⁾は、4つの乳頭間隔全てにおいて産次が進むと有意に増加したと報告している。自動搾乳システム導入農場では初産から3産までの個

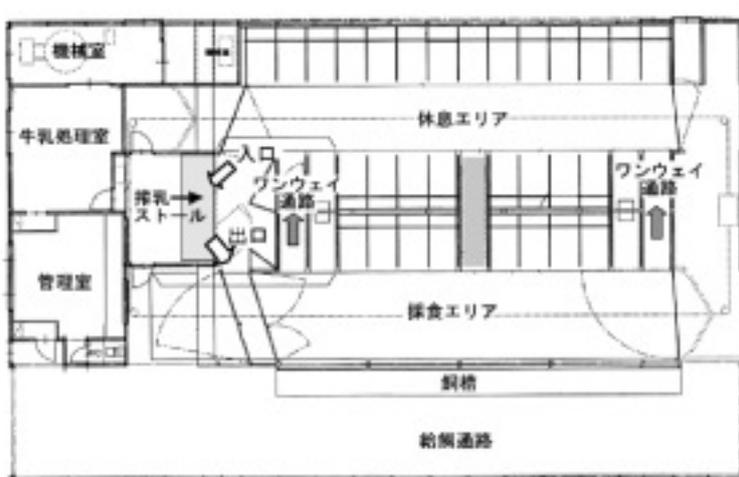


図 3-3 試験農場の牛舎内配置図

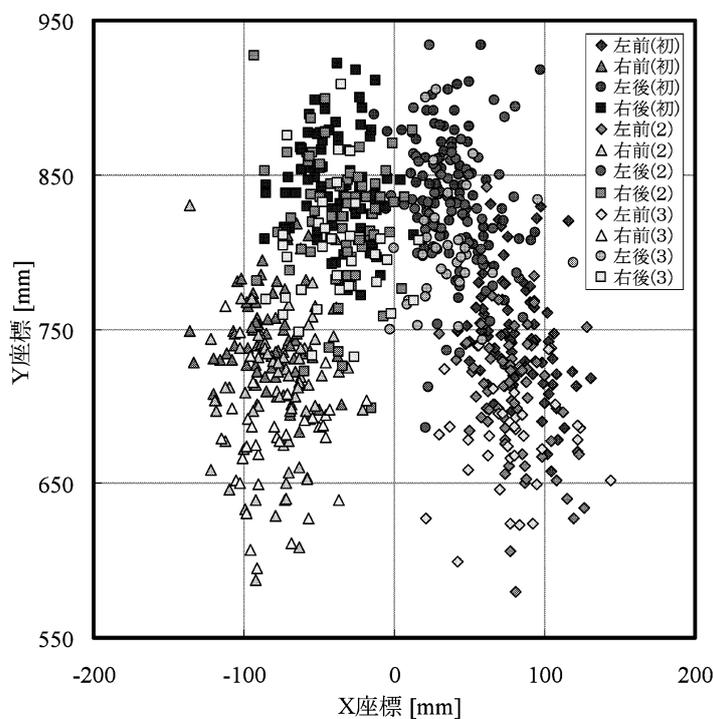


図 3-4 導入 3 農場の乳牛乳頭位置の分布

体がほとんどで、さらに搾乳ロボットの自動搾乳に適合する個体だけで牛群が構成されているため、左右の乳頭間隔に増加傾向が認められなかったと考える。A農場の乳頭間隔は他の2農場に比べて小さかったが、牛群の日乳量の低さが理由と考える。搾乳間隔は乳の貯溜により乳器の形状に変化をもたらす要因の1つであるが、3農場における産次別牛群の平均搾乳間隔は7.1~11.5時間であった。

3.3.2 自動搾乳システム移行前の乳頭間隔と搾乳ロボット適合性

附属農場のホルスタイン牛群について搾乳の前後に測定した乳頭間隔などの結果を表3-2に、ジャージー牛群の結果を表3-3に示した。搾乳前の乳頭間隔は、産次が進むと全てにおいて増加する傾向が認められた。乳房幅においても産次の進行とともに乳器が発達し、幅が増加したが、縦幅に比べ横幅の変化は少なかった。また乳頭先端高さは初産から3産以上になると、ホルスタインでは123~141 mm高さが減少し、ジャージーにおいても62~96 mm減

表 3-1 自動搾乳システムを導入した農場の乳頭間隔, 最低乳頭高さ, 泌乳日数, 日乳量, 搾乳量, 搾乳間隔の産次別平均

産次	農場	頭数	乳頭間隔[mm]				最低乳頭高さ [mm]	泌乳日数 [day]	日乳量 [kg]	搾乳量 [kg]	搾乳間隔 [h]
			前左右	後左右	左前後	右前後					
初産	A	14	147.2	65.3	104.7	104.8	536.9	169	19.6	8.5	10.2
	B	29	167.9	81.3	106.1	103.6	531.4	215	29.4	10.2	8.4
	C	43	164.1	77.4	111.5	112.2	543.5	159	29.1	12.7	10.4
	平均	計86	162.6	76.7	108.6	108.1	538.3	179	27.6	11.2	9.7
2産	A	22	135.2	66.0	105.5	107.5	508.0	241	21.5	8.0	9.5
	B	29	163.6	85.0	125.6	125.1	474.1	138	35.3	10.4	7.1
	C	16	178.4	78.8	130.1	129.9	483.1	133	31.3	14.1	10.5
	平均	計67	157.9	77.3	120.1	120.5	487.4	171	29.8	10.5	8.7
3産 以上	A	8	152.2	86.1	126.7	127.7	428.4	243	19.7	8.3	11.5
	B	26	154.2	74.4	131.4	126.9	422.2	191	30.1	10.9	9.0
	C	1	179.7	93.0	160.5	164.8	438.0	68	46.8	16.2	8.6
	平均	計35	154.5	77.6	131.1	128.1	424.1	199	28.2	10.4	9.5

表 3-2 附属農場におけるホルスタイン牛の乳器形状産次別平均

測定	産次 (頭数)	乳頭間隔[mm]				乳房幅[mm]		乳頭付着角度				乳頭高さ[mm]				体長 [mm]	体幅 [mm]	泌乳日数 [day]	搾乳量 [kg]
		前左右	後左右	左前後	右前後	縦	横	左前	左後	右前	右後	左前	左後	右前	右後				
搾乳前	初産(6)	135.6	53.1	129.1	123.2	433.2	220.2	8.7	12.9	10.2	12.7	565.0	578.1	558.2	585.4	543.9	183.6	160	10.2
	2産(7)	141.5	58.5	150.5	141.0	484.2	233.1	10.2	10.9	11.4	14.1	515.4	517.3	501.9	515.4	557.2	196.5	164	11.6
	3産以上(7)	143.3	62.3	164.9	164.3	498.1	232.4	9.5	11.8	11.8	14.3	441.9	450.0	431.4	444.2	570.9	201.1	169	12.6
搾乳後	初産	106.6	34.4	106.3	103.1	380.4	176.9	8.7	14.4	11.1	13.9	576.1	589.6	572.2	596.2	-	-	-	-
	2産	119.7	40.3	127.4	117.9	427.1	186.2	9.6	11.9	9.4	11.9	530.8	527.8	521.0	525.9	-	-	-	-
	3産以上	121.5	47.5	144.4	140.9	463.2	189.3	9.8	12.0	10.6	12.2	452.0	451.2	437.0	452.4	-	-	-	-

表 3-3 附属農場におけるジャージー牛の乳器形状産次別平均

測定	産次 (頭数)	乳頭間隔[mm]				乳房幅[mm]		乳頭付着角度				乳頭高さ[mm]				体長 [mm]	体幅 [mm]	泌乳日数 [day]	搾乳量 [kg]
		前左右	後左右	左前後	右前後	縦	横	左前	左後	右前	右後	左前	左後	右前	右後				
搾乳前	初産(2)	78.3	53.7	82.5	81.8	360.7	171.7	6.8	12.3	5.7	10.7	484.3	514.0	484.5	504.7	504.0	171.7	346	4.9
	2産以上(2)	91.7	62.5	129.2	138.2	429.7	221.0	9.8	12.8	9.7	7.5	388.8	443.3	422.3	442.2	457.7	176.7	146	7.8
搾乳後	初産	62.3	39.5	84.8	79.7	352.7	139.0	6.5	12.3	5.8	7.8	490.5	509.7	481.5	498.0	-	-	-	-
	2産以上	65.3	42.7	119.0	138.3	390.5	174.3	10.7	13.2	12.7	15.8	387.2	402.3	386.0	415.0	-	-	-	-

少した。搾乳前後の測定結果を比較すると、搾乳直後の乳頭間隔は乳房内の乳汁放出により、ホルスタインで搾乳前に比べ12~35%減少し、特に後ろ左右の乳頭間においてまた初産牛ほどその減少が著しかった。乳頭先端高さは搾乳後に1~4%増加した。

表 3-4 には泌乳期間の乳頭間隔の変化を産次別にまとめた。測定日の泌乳日数は牛群平均でおよそ130日、160日、210日であった。したがって初回測定の日後、80日後の乳頭間隔は初回測定値からそれぞれ-11.0~11.5%、-15.1~12.7%変化し、搾乳前後の変化と同様に後ろ左右の乳頭間における変化が顕著であった。乳頭先端高さは初産を除く牛群で、泌乳期間の推移とともに増加し、3産以上の牛群では初回測定値に比べて7.1%増加した。今回の測定では測定間隔が80日程度と比較的短期間で3回のみ測定であったことや、乾乳などで十分な個

体数が確保できなかったこともあり、泌乳期間の乳器形状の変化を明確に示す結果は得られなかった。しかし、自動搾乳に移行した後は、乳頭位置座標を毎日正確に記録することが可能であるため、より詳細な解析が期待できるものと考えている。

L社の自動搾乳システムにおける乳頭間隔や最低乳頭高さ、左右の乳頭高低差などの推奨値と、前項で述べた既にこのシステムで搾乳を行っている3農場における乳牛のこれらの最小(最大)値および附属農場における牛群の測定結果を合わせて表 3-5 に示した。自動搾乳システム移行前の同農場には推奨条件を外れる個体が存在し、それらは全ての項目において認められた。これらの個体は、ロボットでの搾乳の際に乳頭位置検出が不能となったり、搾乳機の取り付けに失敗したりする確率が高く、自動搾乳システム移行後の牛群に加えない方が良いと思われ

表 3-4 泌乳期間における産次別乳房形状の変化（附属農場）

産次（頭数）	測定日	泌乳日数 [day]	乳頭間隔[mm]				乳房幅[mm]		乳頭付着角度				乳頭高さ[mm]				搾乳量 [kg]
			前左右	後左右	左前後	右前後	縦	横	左前	左後	右前	右後	左前	左後	右前	右後	
初産(15)	7月28日	131	141.3	56.1	126.1	123.7	435.1	222.1	8.1	13.7	11.9	12.5	570.4	581.9	566.9	589.8	10.7
	8月28日	162	136.9	53.9	134.1	126.7	430.9	228.2	8.7	12.3	9.5	13.5	566.4	576.0	558.5	588.7	9.6
	10月15日	214	127.8	48.6	124.6	113.4	421.5	202.5	8.1	13.3	9.7	15.9	557.1	571.8	550.3	581.1	10.1
2産(9)	7月28日	137	129.0	51.2	153.4	138.2	476.3	237.0	9.1	11.6	14.2	13.3	499.9	491.0	476.6	489.9	13.2
	8月28日	168	132.6	57.1	156.8	148.3	518.0	235.7	13.4	10.3	11.0	15.6	516.0	521.8	506.8	519.3	11.4
	10月15日	219	142.1	57.7	146.0	136.5	468.1	233.0	10.4	9.6	12.1	16.2	514.2	515.9	502.6	516.8	10.6
3産以上(16)	7月28日	137	137.9	62.4	166.8	165.4	507.6	242.9	9.1	14.1	11.1	14.1	415.9	429.1	402.5	424.4	14.0
	8月28日	168	143.1	55.5	169.6	175.3	505.6	223.9	10.3	10.3	13.4	13.8	430.3	442.9	417.5	436.1	12.2
	10月15日	219	128.4	53.0	164.0	161.1	483.2	218.3	10.6	10.9	11.7	14.3	445.4	452.9	431.0	447.4	11.5

表 3-5 L社自動搾乳システムで推奨される乳頭間隔と導入農場と附属農場の乳頭間隔の比較

農場	乳頭間隔[mm]				最低乳頭高さ [mm]	高低差[mm]		乳頭 付着角度
	前左右	後左右	左前後	右前後		前左右	後左右	
推奨条件	125~300	>30	>70	>70	>350	<30	<30	<30
A	70	33	70	70	327	31	24	—
B	78	38	75	77	344	47	29	—
C	112	34	76	74	427	21	23	—
附属農場	24	7	63	59	318	80	50	50

る。しかし、既にロボット搾乳を行っている、A、B、Cの3農場の牛群中には、前左右の乳頭間隔（推奨条件値125~300mm）において70mmを示す個体、最低乳頭高さ（同350mm以上）において327mmを示す個体や左右の乳頭高低差（同30mm以下）において47mmを示す個体が確認された。これらのことから実際のロボット搾乳においては推奨条件を超える個体でも搾乳可能な場合もあることが判明した。したがって附属農場の牛群から自動搾乳システムに移行する牛群を選抜する基準として、L社が導入に際して定めた推奨条件と、前述の自動搾乳システム導入3農場における推奨条件を超えた個体の乳頭間隔値により設定した実際条件の2つで適合性を判定した。

表3-6には附属農場における3回の測定結果を基に不適合となった個体数の割合を産次別に示した。推奨条件の3測定回平均において、初産で10.3頭（51%）、2産で4.7頭（38%）、3産以上で17頭（69%）の個体が1つないし複数の項目において適合しなかった。しかし、自動搾乳システム導入3農場の実際条件では初産で4.7頭（23%）、2産で3.3頭（27%）、3産以上で10頭（41%）の個体が不適合となり、推奨条件に比べると大幅に不適合の割合は減少した。乳房形状による不適合の割合は10%程度と言われており⁷⁾、附属農場ではそれを大きく超えた。左右乳頭間隔において不適合の個体は、測定直前まで横臥していたことも原因と推察される。また初産牛は乳房の形成が未熟であるため乳頭間隔が狭く、

表 3-6 推奨条件と導入3農場の実際条件による産次別の不適合頭数と割合

産次	測定日	推奨条件		実際条件	
		頭数	%	頭数	%
初産	7月28日	8	38	3	14
	8月28日	11	55	5	25
	10月15日	12	60	6	30
	平均	10.3	51.0	4.7	23.0
2産	7月28日	5	42	5	42
	8月28日	4	36	2	18
	10月15日	5	36	3	21
	平均	4.7	38.0	3.3	27.0
3産以上	7月28日	17	74	11	48
	8月28日	18	72	12	48
	10月15日	16	62	7	27
	平均	17.0	69.3	10.0	41.0

一方3産以上の牛群では乳房の発達により最低乳頭高さの低下や、左右の乳頭高さに不均衡が生じた。さらに6~8産の頭数も多かったため、附属農場で不適合の個体が多くなったと考える。

3.3.3 自動搾乳システム移行後の搾乳成功率

前項で述べた適合性を参考にして、自動搾乳システムに移行するホルスタイン19頭を選抜した。自動搾乳は導入時点でまだ牛群検定方法が定められていなかったため、2産以上の乳牛の中から完全に推奨条件を満たした適合度の高い個体を選び、その他に推奨条件は充足しないが自動搾乳システム導入3農場の実際条件は満たしているような測定結果が、3

回の測定の中で1回だけあった適合度の低い個体の中からも選抜した。

図3-5には自動搾乳システムに移行した2000年11月6日から19週目の2001年3月19日までの牛群の搾乳成功率を示した。適合度の高い個体は白抜きで、適合度の低い個体は網掛けで示した。また、ここでは移行前の適合度、移行後の搾乳成功率がともに高かった個体は省略した。

移行後の馴致1週間はストールに入る個体を全て搾乳したため、搾乳量不足から搾乳の失敗として記録されることもあったが、2週目から牛群の平均搾乳成功率は90～95%となった。10週目に成功率は87%に低下したが、これは1月中旬の寒波により搾乳機器の凍結するトラブルがあったためである。

移行前の測定では適合度が高かったが乾乳直前の4週目に成功率が82%に低下した個体(No.220)は、分娩後(15週目以降)には95%以上に改善された。また、病気によって乳量が急激に減少し、搾乳成功率が低下した個体(No.283)も認められた。移行前の測定では適合度の低かった6頭の中においても平均搾乳成功率が90%を超える個体(No.210, 269, 272)がいた。

自動搾乳システムでは未搾乳牛がいた場合や搾乳機の装着失敗などにより正常な搾乳シーケンスが完了していない場合、人為的な作業により対象乳牛の搾乳が行われるが、1日1回以上の搾乳が行われている時にはこの作業を行わないことが多い。した

がって1週間の搾乳成功率が約90%以上であれば、自動搾乳システムにおける管理者の作業性に対して影響を及ぼす範囲にはないと考える。

No.217については移行当初から成功率が70～80%を低迷し、追い込みが必要な乳牛となって作業性を低下させた。この個体は移行前の測定で乳頭付着角度が適合条件を満たしていなかった。しかし、搾乳失敗の原因はこれ以外にあるように思われたため、搾乳ロボットの乳頭検出方法から検討してみた。供試した搾乳ロボットは乳牛の前後方向に水平移動とマニピュレータの関節部による回転動作、さらに乳頭検出のレーザセンサとティートカップを伴ったマニピュレータ先端部(マザーシップ)の姿勢決めと搾乳機を装着するため垂直方向の動作を行う4自由度を持っている(図3-6)。搾乳ロボットはマザーシップの姿勢とマニピュレータの水平、垂直動作で主な作業を行う。レーザセンサは中心から後方に向けて120度の範囲を走査する。乳頭の検出は始めに前方の2乳頭を検出してから、マニピュレータを後方に移動させて後ろの2乳頭を確認した後、ティートカップを装着する。No.217の場合はいつも右後ろ乳頭の装着に失敗することから、4乳頭とレーザセンサの位置関係を調べてみると、右後ろ乳頭が右前乳頭の陰になる特殊な乳頭配置にあることが判明した(図3-7)。乳牛の乳頭間隔は前乳頭間隔が広く、後ろ乳頭間隔は狭いのが一般的である(図3-4)。

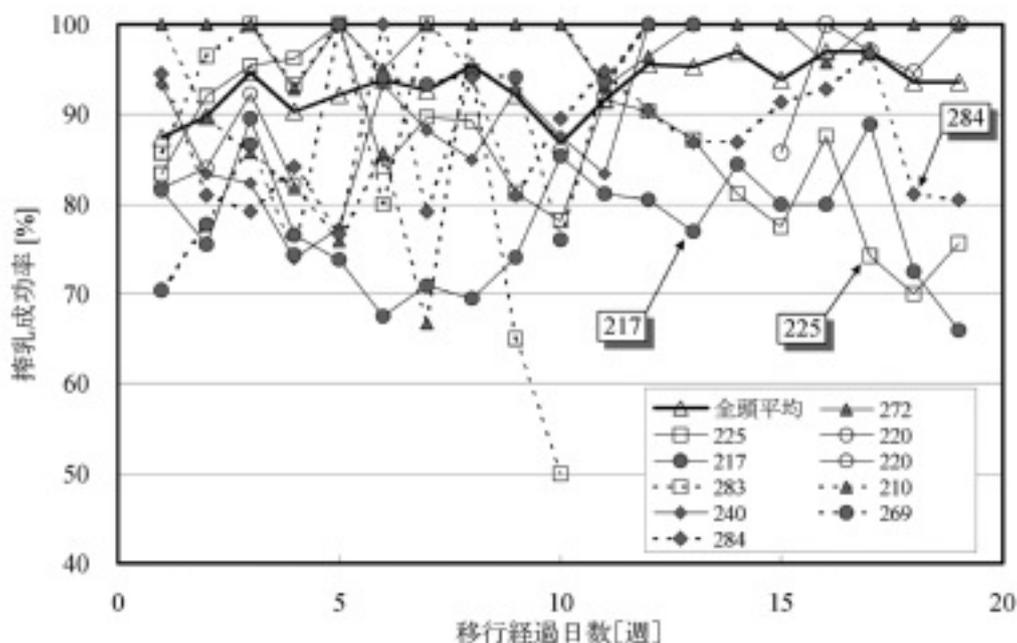


図3-5 自動搾乳システム移行後の経過日数と搾乳成功率

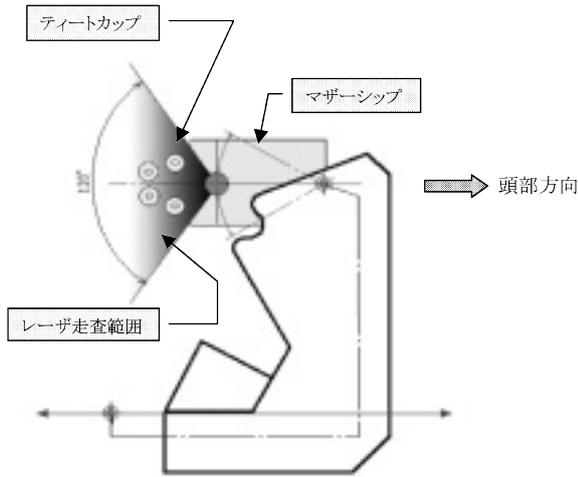


図 3-6 ロボットマニピレータの概略図

しかし、No.217 の場合は前乳頭間隔と後ろ乳頭間隔がほぼ同じで右側乳頭が一列に並び、さらに全体に左側へ偏っていた。

前乳頭位置が後ろ乳頭検出の障害になる場合を図 3-8 に作図して示した。後ろ乳頭を $RR(x_{rr}, y_{rr})$ 、前乳頭を $RF(x_{rf}, y_{rf})$ 、前後乳頭間また後ろ乳頭とレーザー中心までの Y 座標上の距離をそれぞれ α 、 β としたとき、後ろ乳頭検出の障害になる前乳頭座標 $RF_m(x_m, y_m)$ は次式から求められる。

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_{rr}}{\beta}\right) \quad (3-1)$$

$$x_m = \frac{(\beta - \alpha)\sin\theta + r}{\cos\theta} \quad r: \text{乳頭半径 [mm]} \quad (3-2)$$

$$y_m = y_{rr} - \alpha \quad (3-3)$$

これらから乳牛の前乳頭座標 $RF(x_{rf}, y_{rf})$ が後ろ乳頭検出の障害にならないためには、

$$x_{rr} - x_m > 0 \quad (3-4)$$

であることが条件となる。

表 3-7 には搾乳成功率の低い 3 頭 (No.217, 225, 284) の 18 週目の乳頭間隔、乳頭高低差と $x_{rr} - x_m$ の値を示した。No.217 の左側の $x_{rr} - x_m$ 値は -1.1 となり、前乳頭が後ろ乳頭検出の障害になっていることが示された。他の 2 頭の数値は負ではなかったが、推奨条件と比較すると、No.284 は前左右の乳頭高低差が 30 mm を超えていた。No.225 には不適合を示す項目はないが、後ろ乳頭が前乳頭に比べて 27 mm 高い位置にあり、このことが搾乳失敗の原因になっていると思われた。

自動搾乳移行前の調査で適合性が高かった個体 (13 頭) は、病気などで量が低下した 2 頭を除き、移行後の搾乳成功率が 90% を超えていた。また、適合性の低かった個体のうち 3 頭は予想に反して成功率が 90% を超え、移行前の調査結果と一致しなかったが、他の適合性の低い個体は成功率が低かった。供試農場では移行前に適合性の判定を行い、搾乳ロボットに適した牛群を選抜することにより、作業性

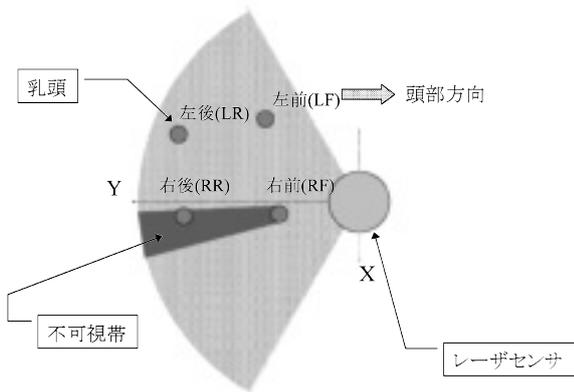


図 3-7 不可視帯にある乳頭配置の例

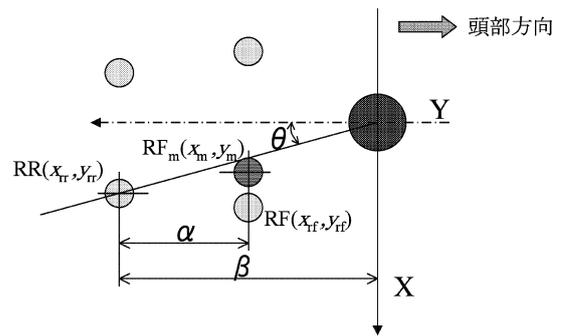


図 3-8 後ろ乳頭の検出障害になる前乳頭位置座標

表 3-7 搾乳失敗回数の多い乳牛の乳頭間隔、高低差と $x_{rr} - x_m$ 値 (18 週目平均)

Cow No.	乳頭間隔 [mm]				最低乳頭高さ [mm]	高低差 [mm]				失敗回数 [回/日]	$x_{rr} - x_m$	
	前左右	後左右	左前後	右前後		前左右	後左右	左前後	右前後		左	右
217	101.7	81.6	93.7	102.0	421	17	10	16	23	1.4	40.8	-1.1
225	138.9	71.5	136.8	109.1	420	11	11	27	27	1.7	71.1	26.0
284	117.8	44.0	130.9	130.6	560	33	5	21	17	0.7	54.1	29.4

の低下を引き起こすことなく自動搾乳システムへの移行を完了することができた。しかし、自動搾乳システムの推奨条件以外にも実際には適合性の高い乳牛や、反対に搾乳ロボットの乳頭検出方法により特殊な乳頭配置が位置検出の障害になることが示された。また、乳器形状は産次間や泌乳期間においても変化することが知られており、乳頭位置の経日、経年変化と搾乳失敗との関係解明が自動搾乳システムの運用に関わる課題と考える。

3.4 摘要

自動搾乳システムを既に導入した3農場と導入を予定している農場において、乳牛の乳器形状や乳頭座標を調査測定し、各個体の搾乳ロボットへの適合性を調べた。さらに自動搾乳システム移行後の搾乳成功率からこれらの適合性を検証した。

1) 自動搾乳システムを導入した3農場における乳牛の乳頭間隔は、産次が進むと前後の間隔については有意 ($P < 0.01$) に増加した。また最低乳頭高さは産次が進むと有意 ($P < 0.01$) に減少した。

2) 導入予定農場における初産牛の51%が、2産では38%が、3産以上では69%が導入機の推奨条件で搾乳ロボットに適合しなかった。しかし、導入した3農場の牛群を基にした実際条件では不適合の割合が大幅に減少した。また、搾乳ロボットに適合しない主要因は前左右の乳頭間隔や左右あるいは前後の乳頭高低差であることが判明した。

3) 自動搾乳システム移行前の調査で適合性が高かった個体は、移行後の搾乳成功率が90%を超えた。適合性の低かった個体の中で3頭は成功率が90%を超える結果となった。しかしその他の個体は成功率が低かったことから、適合性の判定が正当であったことが証明された。

第4章 乳牛の乳頭位置座標の経日、経年変化や搾乳ストール内滞在が自動搾乳システムの運用に及ぼす影響

4.1 緒言

自動搾乳システムを利用している酪農家は日常の搾乳労働から解放される一方で、24時間搾乳であるため深夜においても予測不能な問題の発生を知らせる自動通報システムにより対応を求められる場合がある。これらは搾乳が正常に行われずに終了することが連続した場合や搾乳ストール内での牛の居残りによる場合がある。前者は機械的不具合などが原因となって発生する場合もあるが、おおよそは第3章で述べた乳牛の乳器形状に起因する搾乳ロ

ボットへの不適合によるものが多い。泌乳牛の乳器形状は分娩後日数や産次によっても変わることが知られているが⁷⁶⁾、ある時期に自動搾乳システムでの搾乳が可能な個体であっても、乳頭位置の経日、経年変化によって適合性に影響を及ぼす場合もあり、これらの関係を解明することがシステムの運用面での改善につながると考える。

後者の牛の居残り、すなわち出口扉の開放後、搾乳ストール内に長く止まる乳牛はシステム利用率の低下を引き起こす。この対策としては乳牛退出装置を用いることで防ぐことが可能であるが、乳牛の個体差やストールの構造上の問題からこれらの装置が上手く機能しない場合もある。また、一部の自動搾乳システムに用いられている電気刺激(カウトレナ)による乳牛退出装置は、イギリス、スウェーデン、スイスにおいて家畜への使用が法律により禁止されている⁶⁰⁾。したがって、家畜福祉に準拠した乳牛退出装置の開発が期待されている。さらに乳牛のストールへの進入・退出時間の遅延は自動搾乳システムの稼働率にも影響を及ぼすので、円滑な入退出が求められる。

本章では自動搾乳システムの運用面において影響を及ぼす乳牛の乳頭位置、乳頭間隔について産次や分娩後日数などを経時的に調査、解析を行った。さらに乳牛の搾乳ストールへの進入、退出時間を調べ、システムの稼働効率を改善するための退出装置として、初めて乳牛の聴覚に対する音刺激による装置を試作し、その効果について検討した。

4.2 分娩後日数および産次と乳頭位置座標の変化

4.2.1 方法

乳牛の乳頭間隔の経時変化に関する調査、解析は、第3章と同じL社の自動搾乳システムを導入して搾乳を行っているA牧場(北海道)とB牧場(栃木県)の乳牛個体データを用いた。各個体の乳頭位置座標データは供試システムの乳牛個体管理ソフトウェアから10~14日間毎にバックアップデータを採取し、研究室において同種のソフトウェアに再読み込みさせて各乳頭のX、Y、Z座標を記録した後、その乳頭位置座標から後述する各乳頭間隔等を算出した。A牧場の乳牛データ解析期間は、2000年7月9日から2003年8月5日までの約3年間で、B牧場は2001年10月18日から2003年8月29日までの約2年間である。

乳頭位置座標及び乳頭間隔と直接的な関わりのある乳器の大きさは乳量による変化の影響が大きいと

考えられる。また乳量は分娩後、増加し約6週目で最高日乳量に達し、以後徐々に減少し10ヶ月で泌乳終了に至る泌乳曲線はいくつかの係数からなる式で推定可能であることは既によく知られている^{21,23,84)}。そこで本章の解析においては泌乳6週目(分娩後42日目)から10ヶ月目(分娩後300日目)までの個体データを使用した。

A牧場においては約3年間で乳牛109頭の解析を行い、そのうち分娩後42日から300日までの乳頭位置座標データが解析できた総個体数は初産25頭、2産30頭、3産27頭、4産以上20頭であった。またB牧場においては約2年間で乳牛121頭の解析を行い、同様に初産12頭、2産18頭、3産8頭、4産以上6頭についてその間の日乳量、乳頭位置座標及び乳頭間隔変化量の解析を行った。なお、両牧場ともに5産以上の産次個体が少ないため、これらをすべて4産に含めた。

変化量の解析では泌乳期間の最高日乳量を示すとされる分娩後42日目の乳量別に10~19 kg, 20~29 kg, 30~39 kg, 40 kg以上の4つに区分して集計を行い比較した。A牧場における各乳量区分の解析頭数はそれぞれ8頭、24頭、46頭、23頭、B牧場はそれぞれ4頭、12頭、15頭、13頭であった。

システムは前回の搾乳前に計測された乳頭先端座標(X, Y, Z座標)のみを記録しており、それらの乳頭位置データを個体毎に調べた。解析では乳牛の左前乳頭をLF, 右前乳頭をRF, 左後乳頭をLR, 右後乳頭をRRと表し、各乳頭先端座標からX, Y平面上の4乳頭間隔を計算した。4乳頭間隔は右前後間をDRS, 左前後間をDLS, 前左右間をDF, 後ろ左右間をDRと表した(図4-1)。また、最低乳頭高さ(DFL)は4乳頭先端座標の中で最も低い乳頭の高さ(Z座標)とした。

乳頭位置や乳頭間隔と搾乳機の装着失敗との関係を明らかにするため、各個体データからは解析期間における1週間の搾乳失敗回数の日平均値についても調べた。第3章でも述べたが、供試した自動搾乳システムに適合する乳牛の乳頭間隔推奨条件は、DFは125~300 mm, DRは30 mm以上, DLS, DRSは70 mm以上, DFLは350 mm以上とされている。搾乳失敗が発生した乳牛については、これらの乳頭間隔の推奨条件と乳頭位置座標を比較して因果関係を調べた。

4.2.2 結果および考察

図4-2は1泌乳期の乳牛の日乳量と4乳頭間隔DRS, DLS, DF, DRおよび最低乳頭高さDFLの

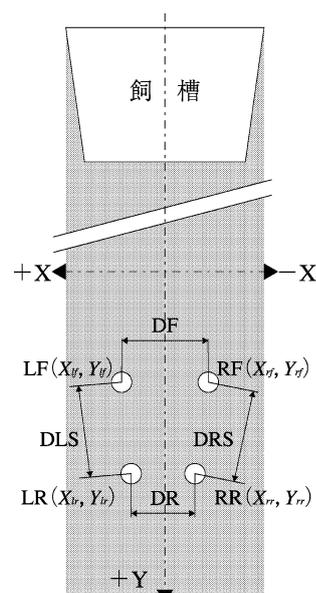


図4-1 搾乳ストール内における乳牛の乳頭座標と間隔

変化の一例を示した。分娩後42日から300日までの期間における日乳量は分娩後の経過日数とともに減少することから、乳房全体が小さくなり、4乳頭間隔DRS, DLS, DFが減少し、DFLが増加する傾向が認められた。これらの変化と分娩後日数の関係を1次回帰式で示し、さらに100日間の変化量(1次回帰式係数×100)を求めて、産次別と個体日乳量別に解析結果を集計した。

図4-3にはA牧場における産次別の100日間の変化量を示した。A牧場では、DRSの変化量は初産-0.3 mm, 2産-3.5 mm, 3産と4産以上はともに-5.3 mmと分娩後日数の経過とともに乳頭間隔は狭くなった。DLSの変化量はそれぞれ0.4 mm, -3.4 mm, -5.0 mm, -4.1 mmとなり、前後の乳頭間隔は初産で変化が少なく、3産までは産次とともに変化量が増大した。DFの変化量は-5.2 mm, -8.0 mm, -9.2 mm, -9.2 mmと分娩後日数の経過とともに乳頭間隔は狭くなった。またDRS, DLS, DFにおいて初産と2産間の変化量の差に比べ、3産と4産間における変化量の差は少なかった。分散分析の結果から、DRS, DLSと日乳量の変化量に関しては産次間に1%水準で、またDFについては5%水準で有意差が認められたが、DRとDFLについては差が認められなかった。

図4-4にはB牧場における産次別の100日間の変化量を示した。B牧場のデータ解析期間は2年で、各産次の解析頭数はA牧場よりも少ないため変化量に違いが認められたが、前後の乳頭間隔については初産での変化が少なく、産次とともに変化量は増大

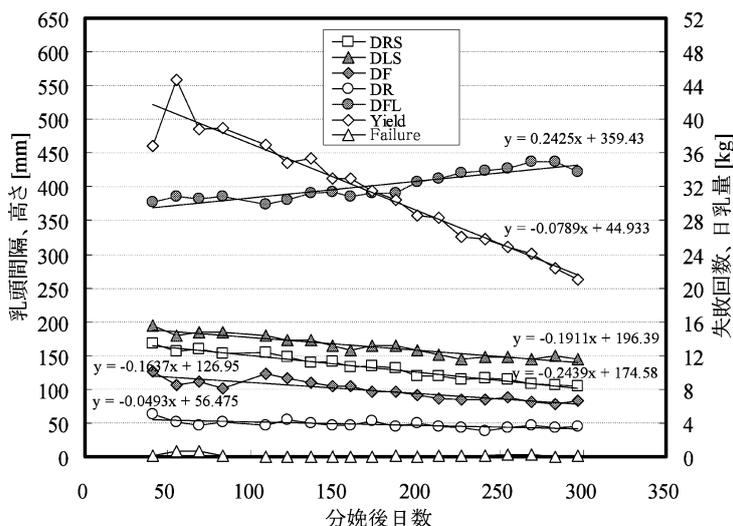


図 4-2 泌乳期の乳頭間隔、日乳量の変化と失敗回数

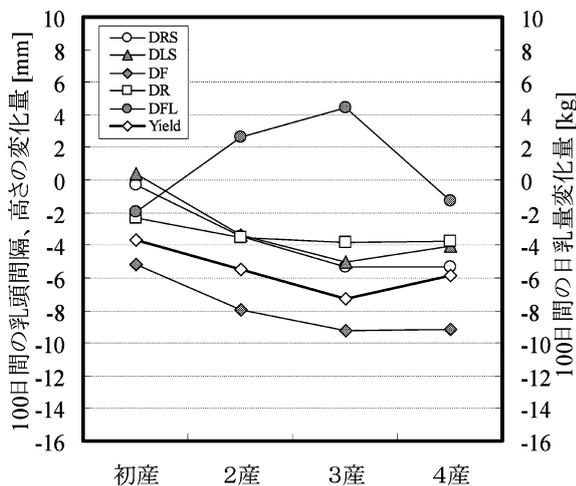


図 4-3 100 日間の産次別変化量 (A 牧場)

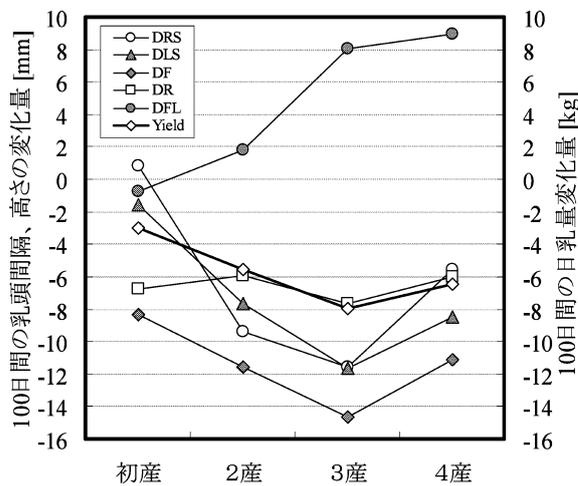


図 4-4 100 日間の産次別変化量 (B 牧場)

するなどA牧場とほぼ同様の結果が得られた。またDRS, DLS と日乳量の変化量に関しても産次間に1%水準で有意差が同様に認められた。

A牧場では異なる産次間で同一個体の泌乳期間における100日間の変化量を初産・2産で13頭, 2産・3産で9頭, 3産・4産で10頭を解析, 比較した(図4-5)。2つの産次間で平均値を比較した結果, 初産・2産間においてDLS, DF, DRの各乳頭間隔の変化量に5%水準で有意差が認められたが, 他の産次間においては有意差が認められなかった。

図4-6, 4-7にはA牧場とB牧場における分娩後42日目の乳量別に各変化量の解析を行った結果を示した。A牧場では乳量が多いほど4乳頭間隔の変化量は大きくなり, 分娩後日数の経過に伴う間隔の減少割合が増加した。DFLは乳量10~19kgの100日間変化量の牛群平均値が-7.4mmと分娩後日数

の経過に伴い最低乳頭高さも低くなることが示されたが, 乳量の増加とともに変化量も増え, 乳量40kg以上では5.8mmと日数の経過とともに乳頭高さが高く変位した。またB牧場では乳量10~19kgの牛群解析頭数が4頭と少なかったことからA牧場とは異なる傾向を示したが, その他の乳量区分においてはほぼ同様の傾向を示した。さらに分散分析の結果から, DRS, DLS, DFの乳頭間隔の変化量においては乳量区分間で有意差が認められた。以上のことから, 分娩後42日目の乳量が多いほどその後の乳量変化量も大きく, 分娩後日数の経過に伴い乳房は徐々に収縮して乳頭間隔が減少した。

表4-1には解析期間において搾乳失敗が1日平均1回以上記録された乳牛の各乳頭間隔などを供試した自動搾乳システムの乳頭間隔推奨条件と比較して原因を推定してまとめた。搾乳失敗の原因はDFす

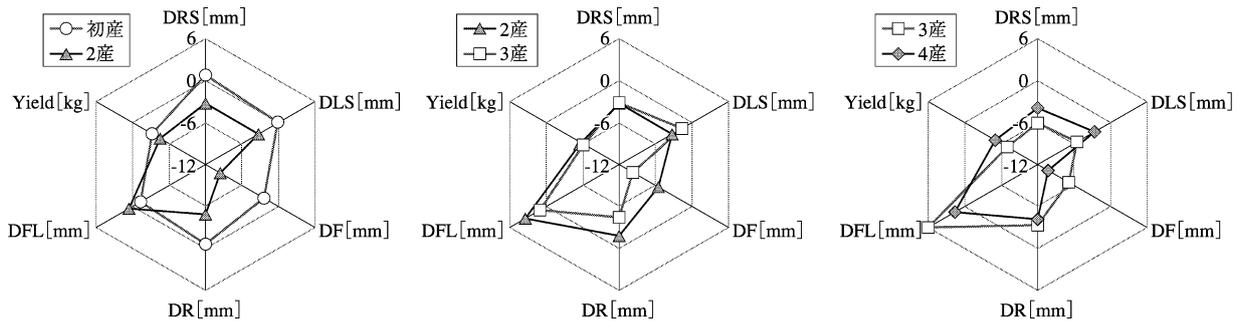


図 4-5 産次の異なる同一個体の 100 日間変化量

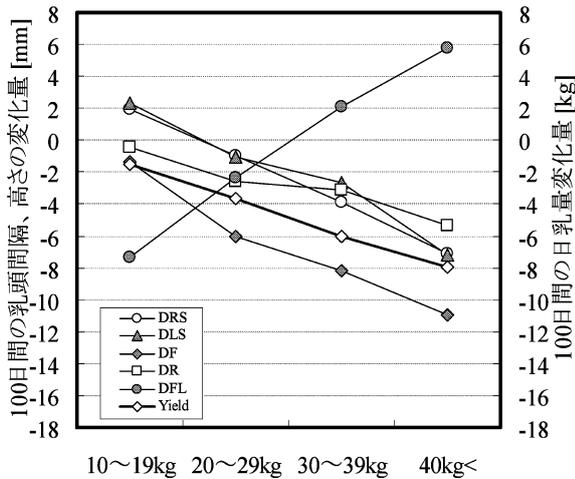


図 4-6 100 日間の乳量別変化量 (A 牧場)

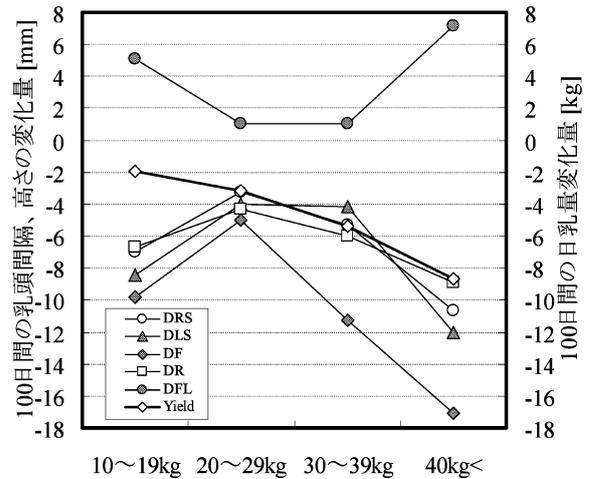


図 4-7 100 日間の乳量別変化量 (B 牧場)

なわち前左右の乳頭間隔が推奨条件である 125~300 mm の範囲になかったものが合計 12 頭と最も多く、次に前左右間あるいは前後間の乳頭高低差が 30 mm 以上であったものが 7 頭であった。産次別では DF が原因による失敗は初産よりも 2 産や 3 産に多く存在した。また搾乳失敗が記録された乳牛が分娩後の次の泌乳期においても搾乳失敗を生じた例が 4 頭について認められた。

以上の結果から、搾乳機の装着失敗の原因となる乳頭間隔の泌乳期間における変化量は初産では大きくないが、産次を経る度に徐々に増大する傾向にあった。また各乳頭間隔の中で DF が最も変化量が大きく、日乳量の多い個体ほど泌乳期間の変化量も大きく、100 日間で 20 mm 以上減少する個体も認め

られた。泌乳初期には搾乳が可能であっても変化量の大きい前左右の乳頭は間隔の減少によって搾乳失敗の原因となる個体が多かったことが前述した失敗原因の解析結果からも明らかである。さらに DF の減少は第 3 章で述べた後ろ乳頭の検出障害となる場合も考えられる。

泌乳期間における経産牛の乳頭間隔変化は主に日乳量が増えると乳房が拡張して乳頭間隔が増加し、日乳量の減少に伴い乳房が収縮し、乳頭間隔が減少する。したがって乳器の形成が不十分な初産牛においてはこれらの変化量が少ない。このことは日乳量と各乳頭間隔の変化量に関して多変量解析をした結果、DRS, DLS, DF と日乳量の間には 0.59~0.66 の単相関係数が得られたことから証明された。言い換えれば日乳量の減少量は WOOD が示した泌乳曲線の推定式⁸⁴⁾や分娩時の季節変動係数²³⁾を利用して求め、さらに本章の結果で得られた乳頭間隔の変化量を利用して、泌乳後期における乳頭座標や間隔を推定することが可能と考える。こうして搾乳失敗の原因となる乳頭間隔を予見し、乳生産のための飼養管理や牛群管理を適切に行うことにより、自動搾

表 4-1 搾乳失敗の原因 (A, B 牧場合計) (頭)

産次	DF	DR	乳頭高低差	不明
初産	1	1	2	2
2 産	4	—	1	2
3 産	5	1	2	—
4 産以上	2	—	2	4

乳システムにおける作業労働を増やす搾乳失敗を未然に回避して、安定的な運用が期待できる。

4.3 搾乳ストールにおける乳牛入退出時間の計測と退出装置の試作

4.3.1 装置および方法

試験は酪農学園大学附属農場（以下、附属農場）の自動搾乳システム単方向移動型牛舎（図 3-3）で実施した。試験装置の概要を図 4-8 に示す。搾乳ストールには出入口扉とストール内に各 1 箇所、さらに出入口扉付近で進入を躊躇する個体の検出用 1 箇所、合計 4 箇所に反射式光電センサを取り付けて乳牛の進入と退出を検出した。退出を促す音を発生させる機器としては周波数 480 Hz、音圧 113 dB のホーン（Mitsuba, Alpha horn）を搾乳ストールの天井部に取り付けた。これらの機器の制御はラダーソフトウェアで作成したシーケンスプログラム（図 4-9）をプログラマブルコントローラ（Keyence, KV-700）に転送して実行した。光電センサからの信号入力、ホーンへの出力は、時系列データとしてモニタリングソフト（Keyence, DB-HI Ver.2）によりコンピュータで収集、記録した。このデータから乳牛の搾乳ストールへの入退出時刻、出口扉開放後から搾乳ストールを退出するまでの時間、またストールへの進入時間などを解析した。さらに自動搾乳システムの搾乳ログデータに照らして進入した個体を識別し、個体乳量、濃厚飼料給与量や時刻、個体による違いが進入、退出時間に及ぼす影響について検討した。

試験期間は 2003 年 8 月 12 日～9 月 3 日の約 3 週間（試験期間 1）、既設のカウトレーナの作動を停止させ、その間の進入および退出時間を解析した。牛群の構成は 2 産が 7 頭、3 産が 7 頭、4 産が 3 頭の計 17 頭、分娩後日数は 3～464 日で、また期間中、新規に入群した個体はなかった。これらの解析結果に基づき、出口扉開放から音刺激退出装置を始動さ

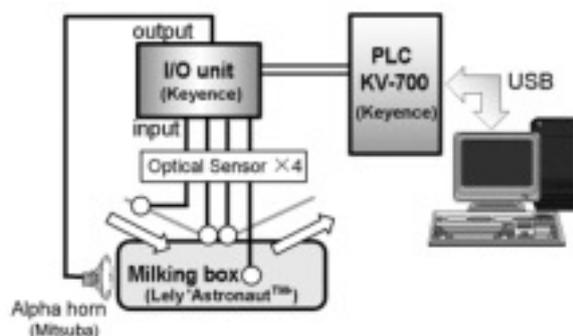


図 4-8 試験装置の概要

せるまでの適切な時間を決定した。

次に 2003 年 10 月 21～28 日の 8 日間（試験期間 2）、設定時間を超えて搾乳ストール内に滞在した場合は音による退出装置を作動させて同様の計測を行った。6 日間の装置停止期間をおいた後、11 月 5～8 日の 4 日間（試験期間 3）は再度退出装置を使用して計測を行い、その後の 5 日間は装置を停止して退出時間の変化を調べた。非退出時における音刺激は 1 回のみとし、また音の発生時間は 0.1 秒とした。牛群の構成は 2 産が 8 頭、3 産が 8 頭、4 産が 2 頭の計 18 頭、分娩後日数は 13～389 日で、試験の期間中に 1 頭が途中で加わった。

4.3.2 結果および考察

4.3.2.1 進入・退出時間

カウトレーナを停止した試験期間 1 において搾乳ストールを利用した 17 頭の進入（計測数 1768）と退出（同 1803）の時間を時刻別に図 4-10 に示した。全日の平均進入時間は 21 秒であったが午前では平均 15 秒、午後では平均 26 秒と差が生じた。しかし、退出時間では午前、午後の違いによる差は認められず、6～13 秒の範囲で変化した。また午前 10～11 時は進入、退出ともに前後の時刻に比べて短くなった。これは試験農場の TMR 給与時刻と一致し、飼槽での採食のために搾乳ストールへの進入、退出が短時間で行われたためと考える。また、進入時間が午前と午後で平均 11 秒の違いが生じたことについては午前の TMR 採食後に起立姿勢での反芻行動による搾乳ストール入口付近での立ち止まりなどが観察されたこと、濃厚飼料が給与される搾乳ストールへの進入誘因が希薄になったことなどが原因と考える。

図 4-11, 4-12 には搾乳ストールへの進入および退出時間と計測数の割合を、乳牛が十分な搾乳間隔を経っていないため搾乳が行われずに出口扉が開き、直ちに退出させられた場合（通過）と搾乳が行われた場合（搾乳）と全個体の場合（全体）に分けて示した。全個体平均進入時間は 21 秒であり、その時間までの計測数 1768 に対する割合は 81%であった。しかし搾乳と通過で比較するとそれぞれ 86%、75%と通過の場合の進入時間が長くなった。搾乳の場合は前回の進入から時間が経過し、採食目的の強い進入動機があるのに対して、通過は搾乳と TMR 採食後に再び短時間で進入し、搾乳ストール入口での反芻行動によって進入時間が長くなったと考える。退出時間において搾乳と通過は 20 秒付近でわずかに差が認められるもののほぼ同一であり、10 秒では

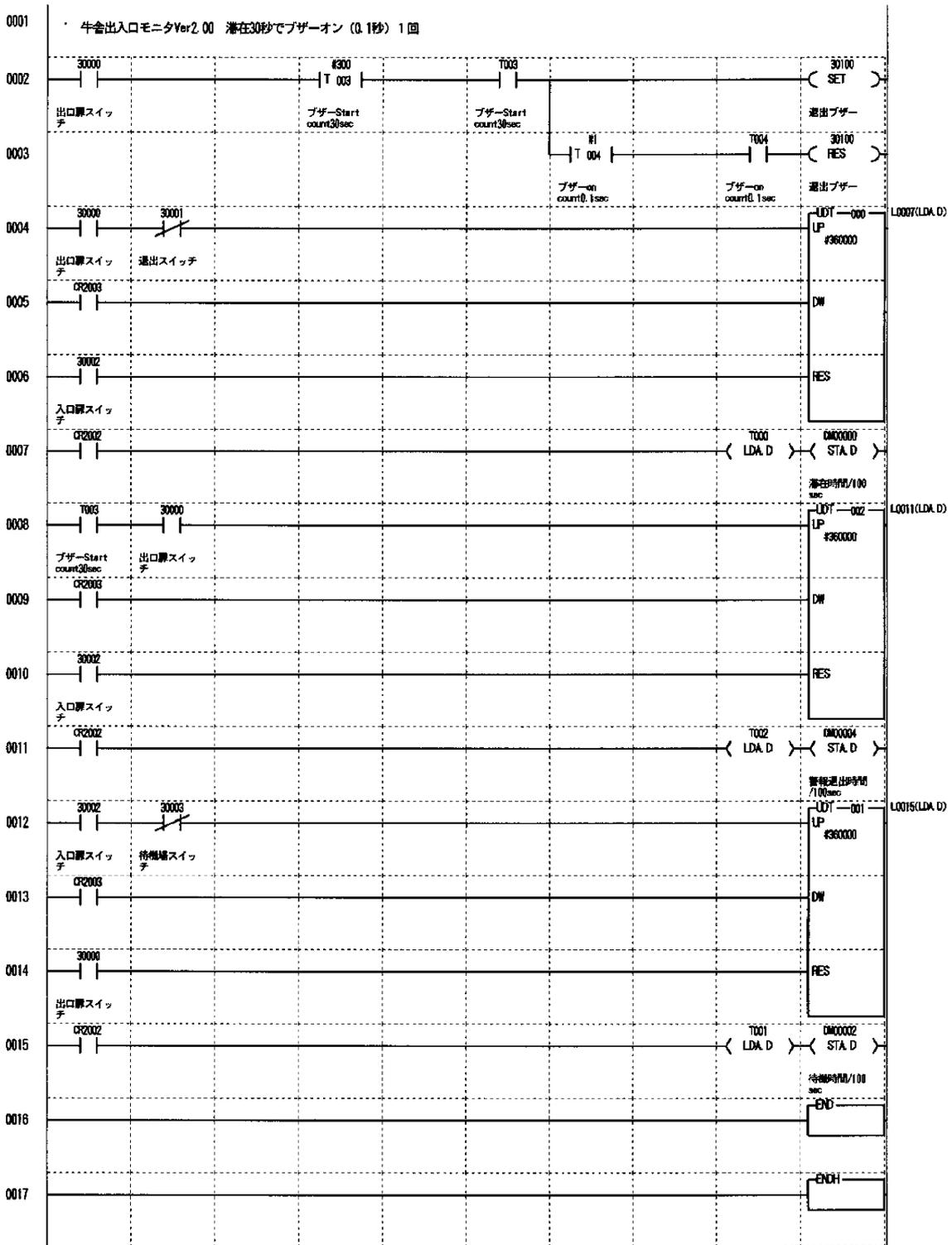


図 4-9 入退出の計測と退出装置制御のシーケンスプログラム

78%，30秒では95%が退出した。

図 4-13 には乳牛の個体別に平均退出時間と 30 秒を超えた退出の割合を示した。平均退出時間は Cow No.325, 326 が 31, 25 秒と最も長く，その他の乳牛は 2～13 秒，平均 6 秒で退出していた。また退出時

間 30 秒を超えた割合では前述の 2 個体がそれぞれ 42, 31%となり，他に Cow No.300, 301 の 2 個体が 30 秒を超える退出時間を計測した。これまでの研究^{37,51,54}で，新たな乳牛は導入条件によって異なるが概ね 10 日以内で自動搾乳システムの利用を習得

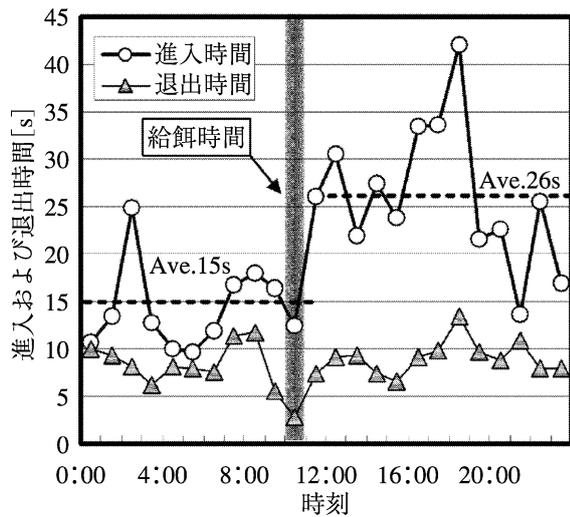


図 4-10 時刻別の進入および退出時間 (試験期間 1)

できるとされている。Cow No.326 は試験開始時に自動搾乳システムの牛群へ移動して 3 日目であり、システムへの順応が不十分であったと考える。

先に述べたように牛群全体では 30 秒後には 95% の個体が退出した。しかし、Cow No.325, 326 の 2 個体は退出率がそれぞれ 58, 69% と低く、システムの利用効率を考えた場合、退出装置によって早期に退出を促すことが必要である。そこで次にこれらの個体を音により退出させる装置の試験を実施した。

4.3.2.2 音刺激による退出装置の効果

前項の結果から音刺激退出装置の始動までの時間は出口扉開放後 30 秒に設定し、それ以前に退出した個体数の割合 (30 秒以内退出率) を求めた。図 4-14 には試験期間 2, 3 において音による退出装置を使用した期間と停止させた期間の退出率と搾乳ストー

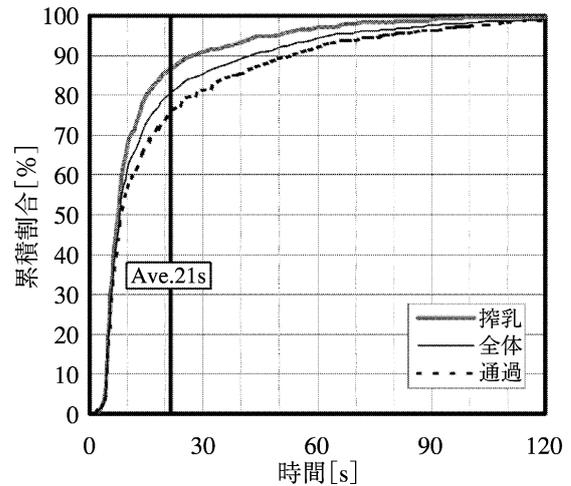


図 4-11 搾乳と通過時の進入時間 (計測数 1768)

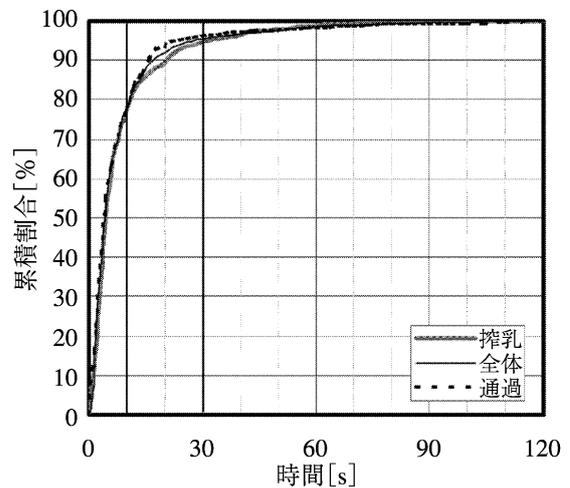


図 4-12 搾乳と通過時の退出時間 (計測数 1803)

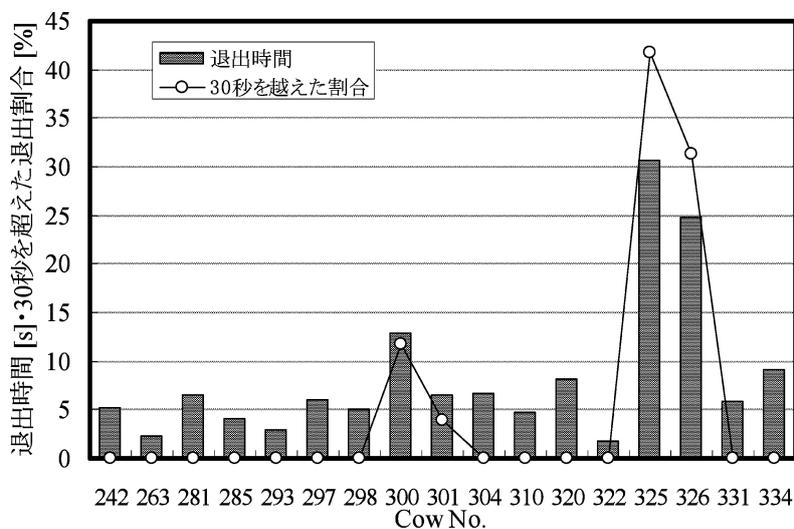


図 4-13 個体別平均退出時間

ルへの入退出回数を示した。搾乳あるいは通過によるストールへの入退出回数は試験期間中に未計測時間や装置の使用、非使用の切り替えのために計測回数が少ない場合もあったが、1日平均120~140回を計測した。退出時間は前項の結果から1日の中で時刻による変化が認められなかったことから未計測時間の退出率への影響はないと考える。

音刺激による退出装置を使用した試験期間2の30秒以内退出率は試験初日の76%から4日目に93%まで改善された。しかし、5日目以降の退出率はあまり変化しなかった。その後、退出装置を停止すると退出率は徐々に低下し、5日目には64%となった。試験期間3においてもほぼ同様の結果が得られた。

図4-15には試験期間2において退出時間が30秒を超えた乳牛5頭の退出装置使用期間と非使用期間の平均退出時間を示した。試験期間2においては試験期間1での退出時間が長い個体とは異なる乳牛も新たに含まれた。Cow No.311は試験期間2の開始時においては自動搾乳システムの牛群へ移動後10日程度であったため退出に時間を必要とした。その

後、退出装置による効果とシステムへの順応によって平均退出時間は43秒と大幅に短縮した。搾乳日数が70~230日を超えていた他の4頭についても、装置使用時の平均退出時間は8~17秒短くなった。

警報装置の音圧113 dBは比較的大きな音であるため牛舎内の乳牛への影響が懸念されたが、発生時間が0.1秒間と短く、また発生回数も2時間に1回程度であったため、ストールへの進入回数や乳量の減少は認められなかった。

以上の結果から、自動搾乳システムの稼働率に影響を及ぼす乳牛の搾乳ストール利用時の進入時間については、給餌方法やストール利用が搾乳と通過によって異なることが明らかとなった。しかし、搾乳ストール内での濃厚飼料の給与量や搾乳量は各個体の進入および退出時間に影響しなかった。搾乳ストールからの退出時間短縮においては4日目までに音刺激に対する乳牛の学習により退出装置の効果が認められた。本試験で実施した1週間の装置作動期間では、装置停止後に効果が持続せず次第に退出率が低下した。したがって音刺激による退出装置は継続的に使用することで乳牛をストールから速やかに退出させて、自動搾乳システムの稼働率を改善する効果が得られたと考える。

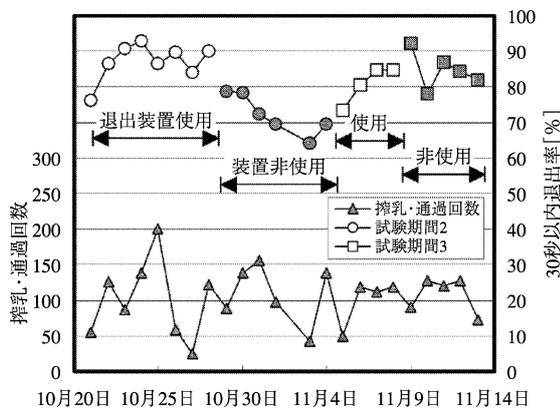


図4-14 退出装置による退出率の変化(試験期間2, 3)

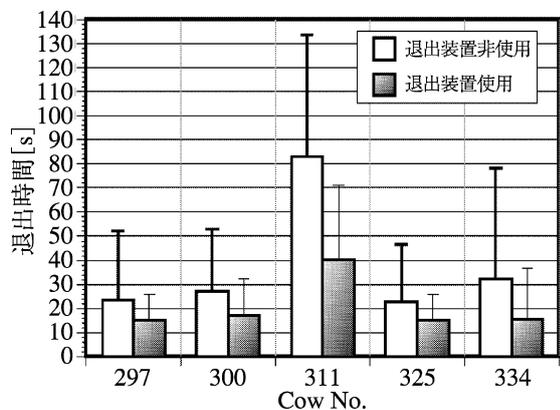


図4-15 個体別の退出時間の変化(試験期間2)

4.4 摘要

本章では自動搾乳システムの運用において影響を及ぼす乳牛の乳頭位置、乳頭間隔について産次や分娩後日数による経時変化を調査、解析した。また、乳牛の搾乳ストールへの進入、退出時間について調べ、システムの稼働率を改善するために音刺激による乳牛退出装置を試作してその効果を検証した。

1) 搾乳機の装着失敗の原因となる乳頭間隔の泌乳期間における変化量は初産次では大きくないが、産次を重ねて乳量が増え、分娩後42日目以降の乳量変化量が大きくなる3産次に乳頭間隔の変化量は最大となった。また各乳頭間隔の中で前左右が最も変化量が大きく100日間で20 mm以上減少する個体も認められた。

2) 搾乳ストールへの進入時間は、給餌時刻や回数、搾乳と通過によって異なった。しかし、ストール内での濃厚飼料の給与量や搾乳量は各個体の進入および退出時間に影響しなかった。

3) 音刺激による退出装置は開始後4日目までに退出時間が短縮し、自動搾乳システムにおける稼働率改善に効果が認められた。

第5章 自動搾乳システムの搾乳能率に関する数理解析

5.1 緒言

搾乳システムは一般に酪農施設の中で最も重要な役割を担うもので、また購入価格も高価でその稼働効率が経営を大きく左右する。特に自動搾乳システムは乳牛の自発的行動によって搾乳が行われるため、牛の自発的行動を阻害しないシステムの配置や効率的な運用を含む利用技術の確立が期待されている。これまでに自動搾乳システムの稼働効率低下に関連して、第3章では乳牛の搾乳ロボットへの適合性について検証し、第4章では泌乳期間における乳頭位置の経時的変化や同一個体の産次間変化と乳牛のストール利用時における入退出時間の遅延について明らかにしたが、搾乳システム本体の能率についてはまだ触れられていない。

搾乳システムの効率的利用に関しては、従来のパラ搾乳における作業人数とユニット台数をパラメータとして作業能率を計測した研究³⁾、また牛群の平均搾乳時間や搾乳ストール数に基づいた作業能率のシミュレーション・モデルの開発^{12,13)}などがある。

自動搾乳システムについて、Sonck ら⁷⁵⁾や Schick ら⁷¹⁾は複数の搾乳ユニットが装備されたマルチ・ボックス型における搾乳ストール数との関係で、Cooper ら⁸⁾は放牧を取り入れた自動搾乳システムについて報告している。しかし我が国において自動搾乳システムは、ほとんどがフリーストール牛舎へのシングル・ボックス型として導入されている。これらの自動搾乳システムの効率的利用に関する研究として、干場ら²⁷⁾は搾乳ストールへ乳牛が入退出する行動面から解析を行っている。いずれの研究も自動搾乳システムが開発、研究されてからの歴史が浅いため、導入を考えている多くの酪農家や稼働率の低い酪農家に対して効率的な利用技術を提供するには不十分である。

本章では、自動搾乳システムを利用する際、個々の酪農場にとっての最適な運用条件を判定するために正確な搾乳能率を求めることを目的として、乳牛個体の搾乳速度、乳量や搾乳回数の設定、また搾乳

システムにおける洗浄時間などのパラメータから搾乳能率の数理的モデルを作成し、3機種 of シングル・ボックス型自動搾乳システムについて評価、考察を行った。

5.2 方法

5.2.1 自動搾乳システムの理論搾乳頭数

L社、O社、D社の自動搾乳システムをそれぞれA、B、Cシステムと称し、それぞれの特徴を表5-1に、作業手順を図5-1に示した。まず搾乳ストールの入口扉から進入した乳牛は個体識別され、搾乳回数などの設定値により、搾乳されるべき乳牛である場合には飼槽に濃厚飼料が給餌され、搾乳作業が開始される。しかし前回の搾乳から十分な時間が経過していない乳牛の場合、直ちに搾乳ストールの出口扉が開き、その乳牛は搾乳することなく退出させられる。一般にこれは通過と称される。自動搾乳システムの機種によっては乳牛が搾乳ストールへ進入する前に、搾乳の可否を判別して乳牛の移動方向を規制するためのセレクションゲートを設ける場合もあるが、本試験におけるA、B、Cのシステムにおいて、これは設置されていなかった。搾乳作業が開始された場合には、搾乳前に乳頭清拭、ティートカップ装着が自動的に行われる(機械作業時間①)。搾乳終了時にはティートカップが各分房毎に離脱してディッピング液を噴霧する(機械作業時間②)。搾乳ストールの出口扉が開いて乳牛が退出する。退出の後、出口扉が閉まると同時に入口扉が開く(扉開閉)。これらの手順は各システムに共通である。

乳頭清拭と前搾りの方式はAとBシステムが洗浄ローラによる清拭とティートカップ装着直後の前搾り乳を分離する方式に対し、Cシステムでは洗浄と前搾りを兼ねた専用カップを各乳頭に装着して行う方式である。またティートカップの装着についても、Aシステムは全乳頭の位置検出終了後、装着を行うのに対し、BとCシステムは位置検出と装着を乳頭毎に行う方式である(表5-1)。

自動搾乳システムの搾乳能力は1台の搾乳ロボットによって搾乳可能な牛群頭数で、この頭数を理論搾乳頭数 N として表すと、これは自動搾乳システムの実稼働時間 $T_{Aw}[h]$ を乳牛1頭あたりの搾乳作

表 5-1 各自動搾乳システムにおける搾乳の特徴

システム	A	B	C
乳頭清拭方式	ローラ (ブラシ)	ローラ (スポンジ)	洗浄・前搾り用カップ
ユニットとマニピュレータ	一体	一体	分離
ティートカップの装着	全乳頭位置検出後	1乳頭検出毎	1乳頭検出毎

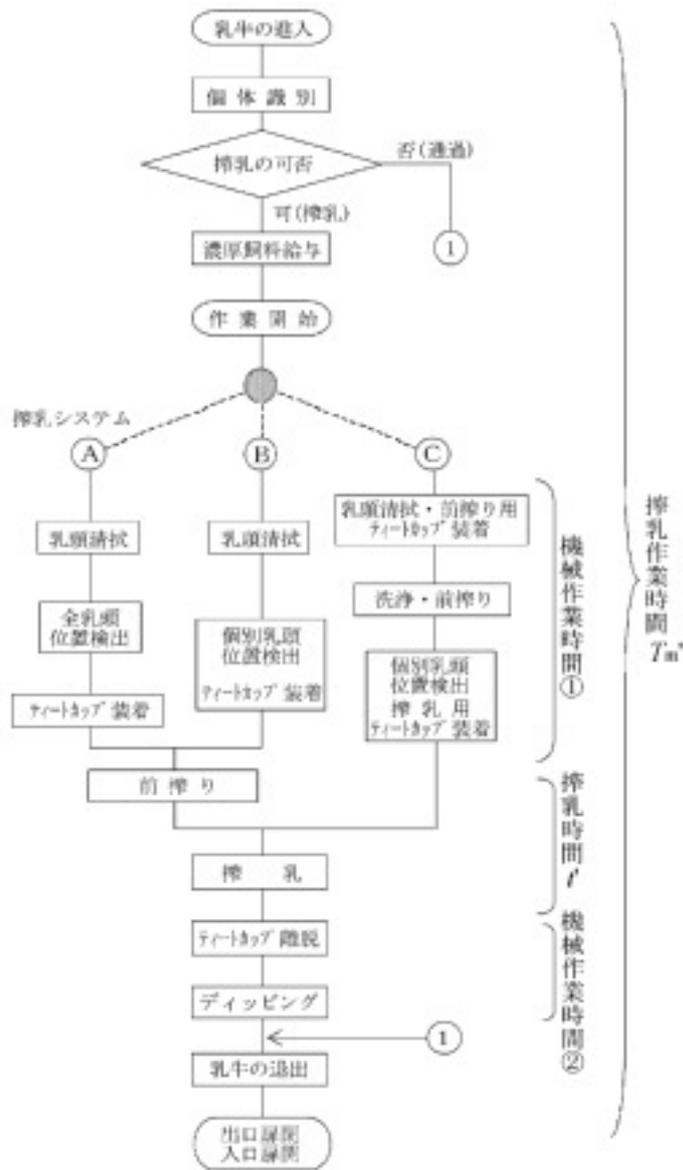


図 5-1 自動搾乳システムにおける搾乳シーケンス

業時間 T [s] で除することで算出できる。

$$N = 3600 T_{AW} / T \tag{5-1}$$

ここで実稼働時間とは搾乳システムの洗浄時間を除いた1日の搾乳可能な時間とする。牛群1頭あたりの搾乳作業時間 T [s] は、1回あたりの平均搾乳作業時間 T_m' [s] に1日の平均搾乳回数 n を乗じて求められる。

$$T = T_m' n \tag{5-2}$$

平均搾乳作業時間 T_m' [s] は前述の機械作業時間(①+②)と乳牛の搾乳ストールへの入退出時間と扉開閉時間を含めた搾乳ロボットの搾乳作業時間 t_1 [s] と搾乳時間 t' [s] の合計であり、搾乳時間 t' [s]

は牛群の平均搾乳速度 f [kg/min] と1回の搾乳量 k [kg] から算出できる。さらに1日の平均搾乳回数 n は牛群の平均日乳量 y [kg] と1回の搾乳量 k [kg] から求められる。

$$T_m' = t_1 + t' \tag{5-3}$$

$$t' = k / (f / 60) \tag{5-4}$$

$$n = y / k \tag{5-5}$$

以上の関係を整理すると、理論搾乳頭数はこれらの変数を含む下記の数理的モデルで表すことができる。

$$N = \frac{3600 f k T_{AW}}{y (f t_1 + 60 k)} \tag{5-6}$$

N : 理論搾乳頭数 [頭]

f : 牛群平均搾乳速度 [kg/min]
 k : 1回あたりの設定搾乳量 [kg]
 T_{AW} : 実稼働時間 [h]
 y : 牛群平均日乳量 [kg]
 t_1 : 搾乳を除く搾乳作業時間 [s]

この数理的モデルを利用することにより、乳牛の日乳量、平均搾乳速度、1回あたりの設定搾乳量など牛群の泌乳特性が変化した場合でも、これらの数値と前述の搾乳作業時間や洗浄時間を除いた実稼働時間から搾乳能率を一様に算出することができ、さらに牛群条件を統一した各自動搾乳システムの能率比較が可能になる。

5.2.2 数理的モデルにおける各定数の算出

5.2.2.1 実稼働時間の計測

従来の搾乳システムにおいては、搾乳前の殺菌や搾乳後のすすぎ（リンス）やアルカリ洗浄、3日に1度程度の酸洗浄が行われている。自動搾乳システムでは設定した時刻あるいは間隔で洗浄が自動的に実行され、その間、搾乳ストールへの乳牛の進入は制限される。自動搾乳システムの実稼働時間は1日24時間のうちから、これらの洗浄時間を除いた時間である。これはシステムの搾乳能率に関わる要因の1つであるため、そこで実際に酸やアルカリ洗浄、リンス洗浄などの間隔を変化させ、実稼働時間に与える影響を調査した。

試験はAシステムを利用するA1農場において、後述する制御プログラムの更新（2002年7月）以前の旧制御システムにより運用されていた2001年7月から10月に実施した。洗浄間隔の変更は1週間毎に行い、リンス洗浄の設定間隔値は一般的な酪農家

の設定値45分を標準にその前後30、60分とし、アルカリ洗浄は同様に9時間を標準に7、11時間、酸洗浄は33時間を標準に30、36時間とし、それぞれ3段階に変化させて1日あたりの平均洗浄時間を算出し、システムの実稼働時間を求めた。

5.2.2.2 搾乳作業時間の計測

搾乳能率の数理的モデルを構築するにあたり、はじめに自動搾乳システムの搾乳作業時間を測定した。調査はAシステムを利用する3農場A1、A2、A3とB、Cシステムを利用する各1農場で2002年7月から10月に実施した。Aシステムは、制御プログラムの更新により、洗浄スタート時刻の固定化、乳頭検出方法の改良が行われており、A2、A3農場では新制御システムが使用されていた。しかし、A1農場では前述の実稼働時間計測の際に旧制御システムで試験を実施し、その後新制御システムに更新されたので、新、旧の制御システムにおいて搾乳作業時間の計測を実施し、それぞれをA1、A1'とした。図5-2にはA1農場の自動搾乳システムの配置を示した。牛舎内における自動搾乳システムの配置は乳牛の行動面に影響を及ぼす場合もあるが、他の農場の配置もA1農場とほぼ同様で、搾乳能率への直接的な影響は少ないと考える。また全ての農場が自動搾乳システムを導入してから2年以上経過しており、乳牛は十分に馴致されていた。

搾乳作業時間の測定は、各農場において自動搾乳システムの搾乳ストール内をハードディスク内蔵ビデオレコーダに24時間記録し、これらの映像からシステムの搾乳作業内容別に平均時間を算出した。ただし、正常な搾乳が行われなかった場合は解析対象から除外した。搾乳作業は図5-1の搾乳シーケンスに示したように、乳牛の進入、乳頭清拭、乳頭検出、

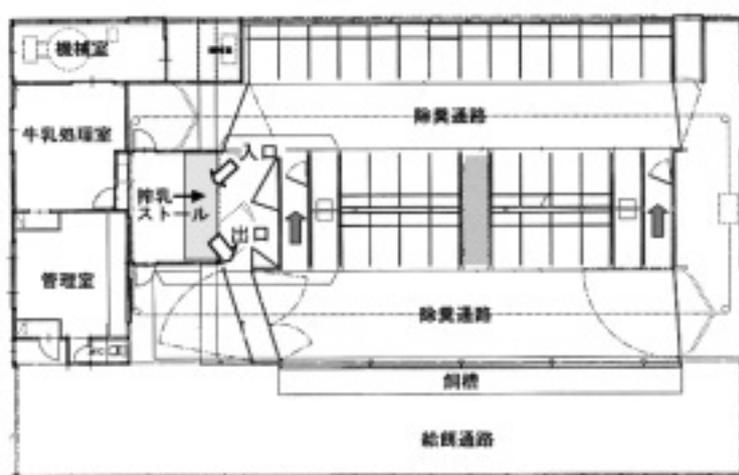


図5-2 A1農場の牛舎内配置

ティートカップ装着、搾乳、ディッピング、乳牛の退出に分類され、搾乳を除いた乳頭清拭からディッピングまでの合計時間を機械作業時間(①+②)とした。しかし、BとCシステムは1乳頭の位置検出毎にティートカップの装着が行われるため、位置検出とティートカップ装着を1つの作業とした。システム毎に全搾乳の平均作業時間と搾乳ログデータから得られる平均搾乳速度、日乳量、1回あたりの搾乳量により牛群平均値を求め、前述の数理的モデルから理論搾乳頭数を算出した。

5.3 結果および考察

5.3.1 実稼働時間

システムの洗浄間隔設定値と1週間の平均実稼働時間の関係を図5-3に示した。1回あたりのリンス洗浄時間はおよそ2~3分、アルカリおよび酸洗浄は16~17分であった。リンス洗浄間隔を標準の45分から30分に短縮したとき、1日のリンス洗浄回数は12回から16回に増え、また60分に拡大すると逆に9回に減少した。したがって、リンス洗浄間隔を60分から30分に短縮すると、酸、アルカリの洗浄を含む1日の洗浄時間の合計は20分増えて1.25時間となり、自動搾乳システムの1日の実稼働時間は23.08時間から22.75時間に約1.5%減少した。また、アルカリ洗浄間隔を11時間から7時間に短縮すると、リンスと酸を含む洗浄時間は17分増え、実稼働時間は22.92時間から22.63時間に約1.3%減少した。アルカリ洗浄間隔の短縮による洗浄回数の増加は1日あたり1~2回程度であるが、1回の洗浄時間が長い場合リンス洗浄の間隔変更時とほぼ同程

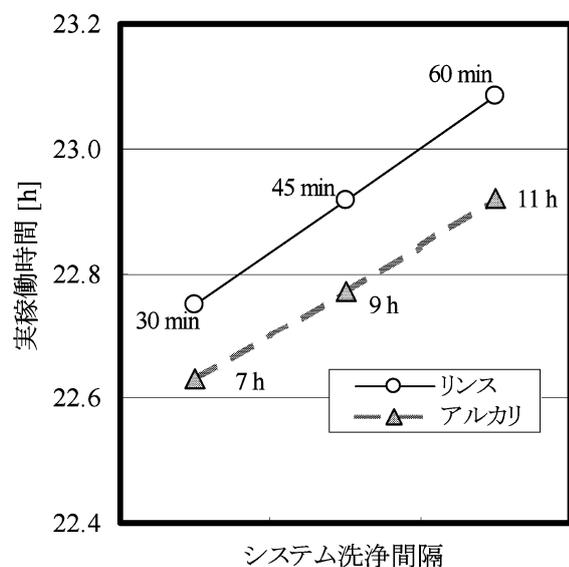


図5-3 自動搾乳システムの洗浄間隔と実稼働時間

度の変化となった。酸洗浄の場合は洗浄間隔の変更による1日の洗浄時間や実稼働時間に変化は認められず、これは酸洗浄の設定間隔が30~36時間と大きいためと思われた。

システムの洗浄間隔の変更による牛乳の品質への影響も懸念されるが、本試験で実施した洗浄間隔の範囲においてバルク乳の細菌数は2~6万個/mlと洗浄間隔による明確な差は認められなかった。

5.3.2 各システムの搾乳作業時間

表5-2には5農場6システムA1, A1', A2, A3, B, Cにおいて24時間の搾乳作業時間を計測した際の搾乳頭数と搾乳回数を示した。搾乳頭数と回数はそれぞれ23頭87回, 23頭86回, 58頭134回, 59頭166回, 23頭48回, 40頭107回であった。A1農場は牛群の平均日乳量が36kg以上あり、また頭数も23頭と少ないため、1日3回以上の搾乳設定が成されていた。

表5-3には、正常な搾乳が行われなかった場合を除いた乳牛の搾乳ストールへの進入から退出までの平均作業時間を示した。搾乳時間は乳牛の搾乳速度や1回あたりの搾乳量の設定によって差が生じることから、1頭あたりの作業時間は図5-1に示したように出入口扉の開閉に要する時間を含む搾乳ストールへの進入から退出までの時間(搾乳作業時間)より搾乳時間を除いた時間とした。A1農場では新制御システムの採用により、旧システムと比較すると清拭が67.4秒から52.4秒へと15秒、ティートカップ装着が30.8秒から23.3秒へと7秒時間短縮され、その効果が認められた(P<0.01)。B, Cのシステムでは搾乳シーケンスが異なるので乳頭位置検出とティートカップ装着の時間を合わせて比較すると、機械作業のほぼ全項目で各システム間に差が認

表5-2 調査農場の牛群搾乳概況

	システム					
	A1	A1'	A2	A3	B	C
搾乳頭数 [頭]	23	23	58	59	23	40
搾乳回数 [回/日]	87	86	134	166	48	107
搾乳回数 [回/頭・日]	3.8	3.7	2.3	2.8	2.1	2.7
平均日乳量 [kg]	36.4	38.5	23.7	26.8	24.8	25.7
平均搾乳量 [kg]	9.6	10.4	11.3	10.4	12.8	10.4
平均搾乳速度 [kg/min]	2.28	2.25	2.45	2.43	2.53	2.33

表 5-3 自動搾乳システムの搾乳シーケンスと作業時間[s]

	シ ス テ ム						
	A 1	A 1'	A 2	A 3	A * ³	B	C
計測数	86	86	120	150	356	34	87
乳牛進入	6.9	9.5	9.2	11.5	9.2	14.2	21.5
乳頭清拭	52.4 ^a	67.4 ^b	55.9	51.9	53.4 ^x	88.6 ^y	93.4 ^z
位置検出	27.5	24.0	29.9	30.9			
ティートカップ装着	23.3 ^a	30.8 ^b	21.6	24.6	52.6 ^x	67.2 ^y	73.3 ^z
ディッピング	7.6	7.6	7.9	6.7	7.4	9.6	14.7
乳牛退出	27.8	33.4	10.5	8.9	15.7	47.8	15.4
扉開閉 ^{*1}	6.2 ^a	8.0 ^b	6.0	6.9	6.3 ^x	9.5 ^y	9.4 ^z
機械作業時間 ^{*2}	110.8	129.8	115.3	114.1	113.4	165.4	181.4
搾乳を除く作業時間	151.7	180.7	141.0	141.4	144.6	236.9	228.0

a, b: p<0.01 x, y, z: p<0.01

※1 扉開閉はリンス洗浄の場合を除く

※2 機械作業時間は乳頭清拭、位置検出、ティートカップ装着、ディッピングの合計

※3 新制御システム3農場(A1, A2, A3)の平均値

められた (P<0.01)。BやCのシステムでは、機械作業時間以外に乳牛の搾乳ストールへの進入や退出に時間を要しており、このような乳牛個体の行動が搾乳作業時間に及ぼす影響は大きいと言える。

各システムの1搾乳シーケンスにおける搾乳を除く作業時間の合計は表5-4に示すように145~237秒を必要とした。De Koningら⁴⁵⁾は、Aシステムのこの時間を120~150秒であると報告したが、本章のA1, A2, A3システムでも、ほぼその値と一致した。全体の搾乳時間はA1', A(A1, A2, A3の平均), B, Cのシステムでそれぞれ465, 428, 560, 519秒となり、これを1時間あたりの搾乳頭数(搾乳能率)に換算すると7.7, 8.4, 6.4, 6.9頭となった。しかし、これらは各農場における牛群の泌乳能力によって左右されるため、次に数理的モデルによる理論搾乳頭数で表した。

5.3.3 理論搾乳頭数による各システムの評価

これまでの解析結果に基づき、(5-6)式の数理的モデルにおいて各システムの搾乳作業時間と1回

あたりの搾乳量(設定搾乳量)を10kg、牛群平均日乳量を30kgとして計算し、牛群平均搾乳速度による理論搾乳頭数の変化を図5-4に示した。制御システムの変更に伴い、自動搾乳システムA1の理論搾乳頭数は平均搾乳速度2.4kg/minの場合でおよそ6%増加して63頭から67頭になった。また、牛群平均搾乳速度が2kg/minから3kg/minに増加すると理論搾乳頭数はA2のシステムで61頭から78頭へ、Bのシステムで48頭から59頭へと23~28%の増加を示した。

同様に設定搾乳量を10kg、牛群平均搾乳速度を2.4kg/minとした場合の牛群平均日乳量による理論搾乳頭数の変化を図5-5に示した。平均日乳量が24kgから34kgに増加すると理論搾乳頭数はA2のシステムで86頭から60頭へ、Bのシステムで66頭から47頭へと29~30%の減少を示した。

平均日乳量を30kg、牛群平均搾乳速度を2.4kg/minとした場合の牛群の設定搾乳量による理論搾乳頭数の変化を図5-6に示した。設定搾乳量が8kgから14kgに増加した場合、理論搾乳頭数はA2のシ

表 5-4 搾乳時間から算出した自動搾乳システムの搾乳能率

	シ ス テ ム			
	A 1'	A *	B	C
機械作業時間①+②[s]	129.8	113.4	165.4	181.4
搾乳を除く作業時間(a)[s]	180.7	144.6	236.9	227.7
牛群平均搾乳時間(b)[s]	284.2	283.8	323.1	291.2
搾乳作業時間(a+b)[s]	465	428	560	519
実稼働時間[h]	22.81	22.29	21.53	22.19
搾乳能率[milking/h]	7.74	8.40	6.43	6.94
" [milking/day]	177	187	138	154

※新制御システム3農場(A1, A2, A3)の平均値

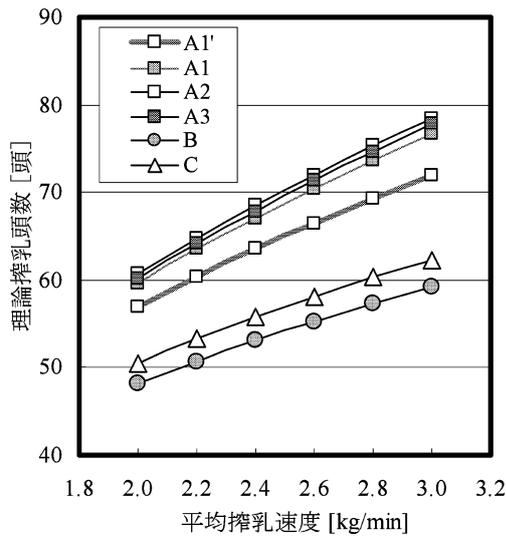


図 5-4 平均搾乳速度による理論搾乳頭数の変化 (平均日乳量 30 kg, 設定搾乳量 10 kg)

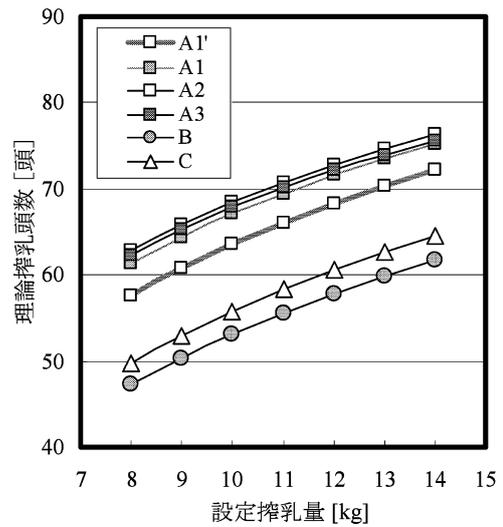


図 5-6 設定搾乳量による理論搾乳頭数の変化 (平均日乳量 30 kg, 平均搾乳速度 2.4 kg/min)

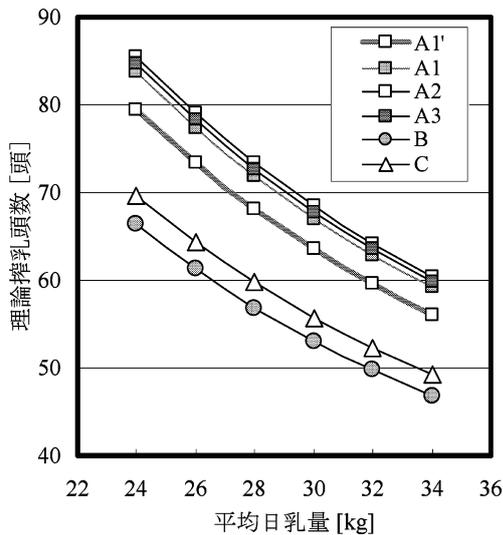


図 5-5 平均日乳量による理論搾乳頭数の変化 (平均搾乳速度 2.4 kg/min, 設定搾乳量 10 kg)

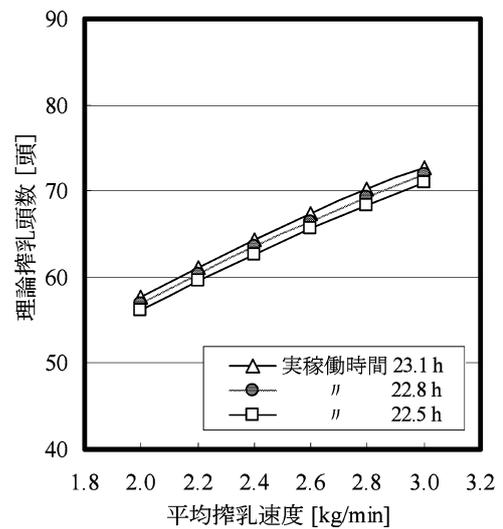


図 5-7 実稼働時間と理論搾乳頭数 (平均日乳量 30 kg, 設定搾乳量 10 kg)

システムで 63 頭から 76 頭へ、B のシステムで 47 頭から 62 頭へと 21~32% の増加を示した。

以上のことから、自動搾乳システムにおいて牛群平均搾乳速度が増えると搾乳時間が短縮されて理論搾乳頭数は増え、また牛群の設定搾乳量を増やすと搾乳回数が減少して、同様に理論搾乳頭数は増加し、牛群の日乳量が増えた場合は設定搾乳量が同じであれば搾乳回数が増えるので、理論搾乳頭数は減少することが示された。

前述した A システムにおける洗浄間隔の変更による実稼働時間の計測結果から、実稼働時間は 22.5~23.1 時間まで変化すると仮定し、それによる理論搾乳頭数への影響を数理的モデルにより計算し

て図 5-7 に示した。設定搾乳量を 10 kg、牛群平均日乳量を 30 kg とした場合、理論搾乳頭数は 1~2 頭 (約 3%) 程度の差となり、洗浄間隔の変更が自動搾乳システムの搾乳能率に及ぼす影響は少なかった。

供試した自動搾乳システムにおいては搾乳ストールの手前にセレクションゲートが設けられていなかったため、乳牛の搾乳ストール通過時間が発生した。本章の数理的モデルではこれらのストール通過時間を考慮しなかったが、本試験の搾乳作業時間計測において乳牛が搾乳ストールの通過に要した時間はおよそ 10~15 秒であったことを考えると、搾乳可能頭数は 1 割程度減少すると推察できる。

本章で示した搾乳能率の数理的モデルにより、牛

群の日乳量、平均搾乳速度やシステムの設定搾乳量などの自動搾乳システムを利用する条件が変化した場合においても、搾乳可能な牛群頭数が算出できた。また牛群の平均搾乳速度はおよそ2.2~2.5 kg/minであることを考慮すると、この数理的モデルの計算結果から、搾乳量の設定によって搾乳能率をおよそ20~30%程度増加させることができ、また牛群の日乳量や搾乳速度を考慮して搾乳量や搾乳回数を決定した場合、システムや乳牛に負担のかからない範囲で自動搾乳システムを効率良く運用することが可能と考える。

これまでの搾乳能率のシミュレーション・モデルに比べると、全作業が自動化された自動搾乳システムにおける搾乳作業時間の主な変動要素は搾乳時間だけであり、したがって牛群の泌乳能力を掌握することにより容易に搾乳能率を算出することが可能であった。さらに自動搾乳システムでは群毎にあるいは個体毎に設定した搾乳回数とそれぞれの泌乳能力データを得ることが可能なので、より正確な搾乳能率の数理モデルを作成できる。その一方で乳牛の自発的行動による自由搾乳であるため、前章までに述べた搾乳ストールでの入退出の遅延や搾乳ロボットとの適合性が低く乳頭位置検出およびティートカップ装着の時間増加を引き起こす個体が存在する場合は数理モデルとの間に差が生じる。また、実際の自動搾乳システムの運用においては、搾乳頭数が本章の数理的モデルで算出された理論搾乳頭数に近づいたとき、搾乳ストールの利用効率が上昇し、ストールの入口付近で搾乳を待つ個体が生じ、乳牛の採食行動を遅延させてしまうことも考えられる。自動搾乳システムの最適な稼働率や数理モデルの整合性については、このモデルを用いた複数農場の搾乳記録データの解析から、さらなる検証が必要である。

5.4 摘要

自動搾乳システムの効率的運用を図るため、搾乳能率（理論搾乳頭数）の数理的モデルについて検討した。数理的モデルの構築にあたり、3機種5農場で24時間、自動搾乳システムの搾乳作業時間を測定した。また、自動搾乳システムの洗浄間隔を変えて、システムの実稼働時間を調査した。その結果、以下の結論を得た。

1) 作成した数理的モデルを利用することにより、乳牛の日乳量、平均搾乳速度、1回あたりの搾乳量など牛群泌乳特性の条件が変化した場合でも、搾乳能率を算出することが可能になった。

2) 各システムの理論搾乳頭数は、牛群平均搾乳

速度が2 kg/minから3 kg/minに増えると23~28%増加し、平均日乳量が24 kgから34 kgに増えると29~30%減少した。さらに設定搾乳量を8 kgから14 kgに変えると、理論搾乳頭数は21~32%増加した。

3) システムの洗浄間隔を変更することで実稼働時間は1.3~1.5%変化したが、これによる理論搾乳頭数の変化は約3%とその影響は僅かであることが判明した。

第6章 自動搾乳システムの運用における最適化

6.1 緒言

自動搾乳システムは乳牛の自発的行動によって搾乳を行う不定時搾乳であり、その搾乳能率は単位時間あたりの搾乳頭数で表される1日2回の定時搾乳の場合と異なり、システム（搾乳ロボット）の1日の全搾乳回数、あるいは搾乳頭数で表わされることが多い。第5章では自動搾乳システムの能率に関わる要因を整理して、搾乳能率をシステムが自動記録する乳牛の泌乳量や搾乳速度など、泌乳能力によって変化する搾乳時間、搾乳以外の機械作業時間や乳牛の搾乳回数から求める数理的モデルを提案した。このモデルの使用は、異なる自動搾乳システムの搾乳能率を比較する場合や個々の酪農家で飼養する牛群の泌乳能力に応じたシステムの構築を可能にした。

一方、自動搾乳システムの搾乳能率が乳牛の泌乳量、搾乳速度などの泌乳能力に深い関わりがあることはこれまでに述べたとおりであるが、同様に自動搾乳システムにおける搾乳ストール内での給餌もこれらと密接な関わりがある。搾乳ストール内での配合飼料の給与は、搾乳ストールへの進入回数を増すための呼び餌としての目的のほか、フリーストール牛舎内における自由採食のTMRや粗飼料の養分不足を補う目的もある⁷⁾。しかし、搾乳ストール内での給餌速度が適切でない場合、搾乳中に配合飼料の予定量の給与が終了し、乳牛の落ち着きがなくなったり、逆に搾乳が終了する前に予定量を給与できなくて未給餌量が増えたりすることが生じる。このような問題を解決するためには搾乳ストール内での給餌速度を個々の乳牛の搾乳速度や搾乳量に合わせて適切に設定することが必要となる。

そこで、本章では自動搾乳システムにおける搾乳ストール内での給餌速度を数理化してそのモデル式を作成し、その妥当性について実証試験を行った。さらに搾乳能率の数理的モデルを用いて自動搾乳システムを導入した複数農場の搾乳記録データを分析

して、牛群の泌乳能力や搾乳回数の設定が異なる農場のシステム稼働率を解析することにより、システム運用において搾乳回数や搾乳頭数がどのように影響するか明らかにした。

6.2 方法

6.2.1 給餌速度モデルと実証試験

実証試験は、図 6-1 に示すように L 社のシングルボックス型の自動搾乳システム 3 台を使用して終日自由搾乳を行っている苫小牧市植苗の実証試験農場で実施した。試験を開始するにあたり、自動搾乳システムが記録する 4 週間の搾乳ログデータから搾乳ストール内での配合飼料の 1 日あたりの設定給餌量および未給餌量、日乳量、搾乳速度、搾乳量、搾乳回数を搾乳牛 135 頭について調査した。次にそれらの中から設定給餌量に対する未給餌量の割合（未給餌率）が 5% 以上の乳牛を選抜し、新たに設定した給餌速度の異なるグループに編入させ、その後の未

給餌率の変化を調べた。給餌速度の変更は 2003 年 5 ～ 8 月までの間、約 3 週間の間隔を置いて 2 回実施した（試験 1, 2）。なお、変更前の給餌速度は全頭が 0.55 kg/min に設定されていた。

表 6-1 には試験期間と各牛群のグループ頭数を示すが、試験農場では牛群を A, B, C の 3 グループに分けて搾乳回数の設定が行われていた。A グループは前回の搾乳からの時間間隔に関係なく、搾乳ストールに進入した乳牛は全て搾乳を行った牛群である。B と C はそれぞれの日乳量と分娩後日数により 1 日の搾乳回数が決められたグループである。また、各グループの搾乳ログデータから未給餌率 5% 以上の個体を調べた結果、A グループに 2 頭、B グループに 12 頭存在した。そこで、試験 1 ではこれらを搾乳回数が同等で給餌速度のみ異なる新給餌速度グループ A', B' に編入し、試験 2 では B' グループに 14 頭を編入した。全試験期間における搾乳牛群の平均日乳量は 29.6 kg, 平均搾乳回数が 2.7 回, 分娩後平

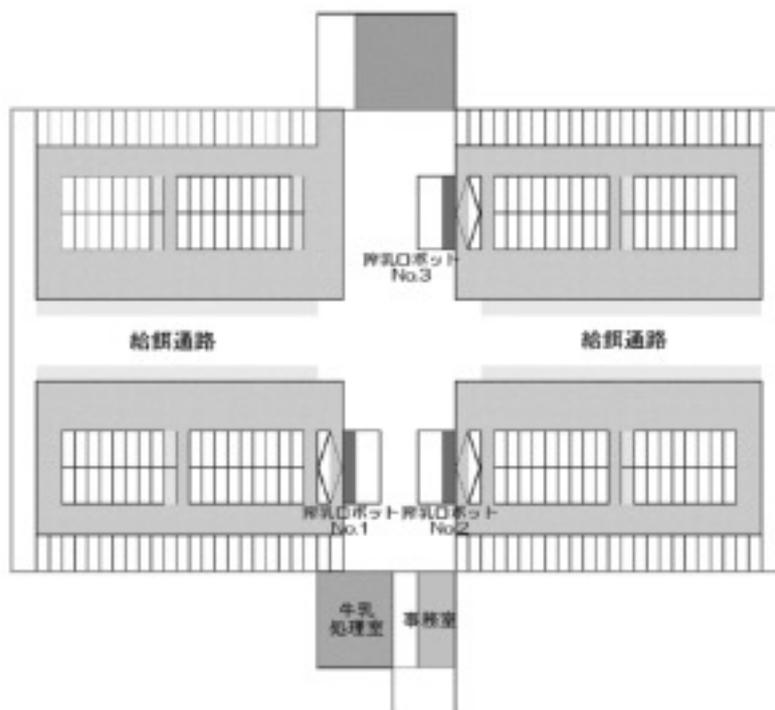


図 6-1 給餌速度モデルの実証試験農場の牛舎レイアウト

表 6-1 試験期間と牛群グループ頭数（給餌速度モデル実証試験）

	期間	搾乳頭数	従来の給餌速度グループ			新給餌速度グループ	
			A	B	C	A'	B'
試験 1	2003.5. 1～5.31	134	6	125	3	—	—
	6. 8～6.27	126	3	107	2	2	12
試験 2	6.29～7.15	126	9	116	1	—	—
	7.24～8. 7	133	6	112	1	0	14

均日数は182日であった。また、牛群の産次構成は初産63%、2産30%、3産5%、残りが4産以上であった。

未給餌量を減少させるためには、各搾乳牛の設定給餌量 F [kg] に対してストール内での給餌速度 S [kg/min] を適切に設定することが求められる。搾乳ストール内で配合飼料が給餌される時間 T'_f [min] は、乳牛がストール内に進入し個体識別されてから搾乳が終了するまでの間、すなわち搾乳前処理作業時間 t_2 [s] と搾乳時間 t' [s] の合計時間である。また、搾乳時間 t' [s] は1回の設定搾乳量 k [kg] と平均搾乳速度 f [kg/min] から算出できる。

$$S = F / T'_f \quad (6-1)$$

$$T'_f = (t_2 + t') / 60 \quad (6-2)$$

$$t' = k / (f / 60) \quad (6-3)$$

以上の関係を整理すると、設定給餌量に対する最適な給餌速度（理論給餌速度）はこれらの変数を含む下記の給餌速度モデルで示すことができる。

$$S = \frac{60fF}{(ft_2 + 60k)} \quad (6-4)$$

S : 理論給餌速度 [kg/min]

f : 牛群平均搾乳速度 [kg/min]

F : 搾乳1回あたりの設定給餌量 [kg]

t_2 : 搾乳前処理作業時間 [s]

k : 1回あたりの設定搾乳量 [kg]

この給餌速度モデルを利用して前述の搾乳ログデータから未給餌率の高い牛群に新たな給餌速度を設定し、新給餌速度グループにおける期間と従来の給餌速度 (0.55 kg/min) グループにおける期間の給餌量、未給餌率、搾乳回数、日乳量、平均搾乳速度、1回の設定搾乳量を比較した。また、試験期間に測定した未給餌率と乳牛の理論給餌速度からこのモデルの適合性について検証した。

6.2.2 システム記録データの解析

自動搾乳システムの記録データの解析は実証試験農場と同様にL社のシングルボックス型搾乳ロボットを利用している31農場、38台に関して実施した。記録データは各農場の乳牛管理コンピュータ内に一定期間記録されており、その期間は各農場の設定により異なる(7~53日間)。各農場のコンピュータからこのデータを採取して、同種の管理ソフトウェア(エキスパートシステム)が作動するコンピュータ上で再読込し、さらに搾乳や牛群繁殖データなどの項目別に仕分けできるプログラム^{5,40)}を用いて解析を

行った。

搾乳データからは、各個体の平均日乳量や平均搾乳速度を求め、搾乳回数、1回あたりの設定搾乳量とそれぞれの牛群平均値を農場毎に求めた。また、牛群繁殖データからは各乳牛の分娩日、産次、所属グループを、そして自動搾乳システムのロボット稼働データからは稼働時間、洗浄時間、リフューズ(通過・追い出し)時間を求めた。

自動搾乳システムの運用状況は、以上のデータと第5章で述べた搾乳能率の数理的モデル(5-6)式から各農場における自動搾乳システムの理論搾乳回数を算出して調べた。次に搾乳回数換算の稼働率(実搾乳回数/理論搾乳回数 $\times 100$, [%])を求め、自動搾乳システムの運用面での評価を行った。

6.3 結果および考察

6.3.1 給餌速度

図6-2には給餌速度の変更前における個々の乳牛の設定給餌量と未給餌率の関係を示す。Aグループの乳牛は搾乳ストールへの進入回数が少ないため、搾乳間隔に関係なく、ストールに進入した場合は全て搾乳を行った。これらの乳牛は搾乳回数が2回以下の場合や搾乳量が極端に少ないことから搾乳が短時間で終了する場合も多く、予定量の給餌が行えずに設定給餌量に関係なく未給餌率が高くなった。Aグループ以外の未給餌率は搾乳1回あたりの設定給餌量が2.5 kg以上になると次第に増加する傾向が認められた。搾乳ストール内での1日の給餌量は乳量などに応じて個体毎に設定されるが、1日の搾乳回数が少ない場合、1回の搾乳時に給餌される量が多くなる。このような場合には搾乳後のTMRや粗

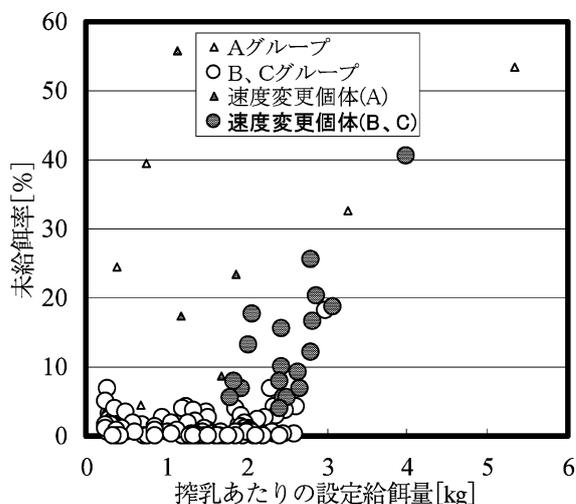


図6-2 給餌速度変更前の設定給餌量と未給餌率

飼料の採食量が減少することも指摘されている³⁴⁾。自動搾乳システムでは配合飼料の大量摂取を避けるため、1回の給餌量の上限値を設定でき、供試農場では2.5kgに設定されていた。したがって、これらの個体の未給餌率を減らすためには搾乳回数の少ない個体の上限値や設定給餌量を変更するか、あるいは給餌速度を最適化する必要があると思われた。

試験1の前期間(表6-1, 31日間)で未給餌率が5%以上であったAグループ2頭, Bグループ12頭の牛群は表6-2が示すように平均搾乳速度2.3kg/min, 平均搾乳量(1回あたりの設定搾乳量)11.5kg, 搾乳時平均給餌量2.1kgであった。供試農場の自動搾乳システムの搾乳前処理作業時間は106秒であったことから、(6-4)式の給餌速度モデルで理論給餌速度を計算した結果, 0.31kg/minとなった。理論給餌速度は平均搾乳速度の上昇とともに緩やかに増加し, 搾乳時平均給餌量が多いほど図6-3に示すようにその増加割合は大きくなる。また, 1回の

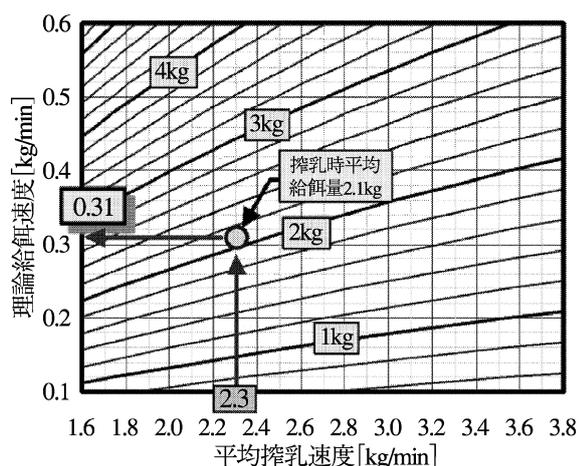


図6-3 給餌速度モデルによる理論給餌速度のシミュレーション
(搾乳前処理作業時間106秒, 設定搾乳量11.5kgとした場合)

給餌量の上限値2.5kgを超えた10頭について同様に計算した結果においても理論給餌速度は0.38kg/minとシステムの初期設定給餌速度0.55kg/minよりも低い数値となった。

泌乳牛における濃厚飼料の採食速度はおよそ0.25~0.4kg/minであるとされており⁶⁵⁾, それを上回る給餌速度に設定した場合には残飼を増やすことも危惧される。しかし, 初期設定値0.55kg/minでも未給餌率の高い個体が認められたことから, これらには給餌速度モデル以外の何らかの要因も影響していると考えられた。そこで試験1と2の期間における対象牛の給餌速度を初期設定値よりもさらに増して0.75kg/minに設定し, その後の未給餌率の変化を調べることにより原因を究明した。

表6-3には乾乳などの理由で離群した個体を除き, 給餌速度の異なる期間で比較することができた試験1の11頭, 試験2の12頭について給餌量, 未給餌率, 搾乳回数などをまとめて示した。試験1において給餌速度を変更する前の平均未給餌率は12%であったが, 変更後の平均未給餌率は2.4%に減少した(p<0.05)。また, 試験2においても同様に給餌速度の変更前の平均未給餌率は18.4%であったのに対し, 変更後は7.2%に減少した(p<0.05)。しかし, 個体別に比べると試験1で搾乳回数が1日2回以下の乳牛2頭は給餌速度を変更した後も未給餌率が20%以上であった。試験2でも同様に4頭のうち3頭は給餌速度の変更後も未給餌率が18~36%と高い値を示した。

図6-4は対象乳牛の設定給餌速度に対して各個体の平均搾乳速度, 1回の設定搾乳量や設定給餌量から給餌速度モデルに基づき算出した理論給餌速度との差とそれぞれの未給餌量を示し, さらにその未給餌量をなくすために必要な給餌速度の増加分を設定給餌速度0.55kg/minに加えた値を適正給餌速度として示した。理論給餌速度との差と未給餌量には

表6-2 新給餌速度グループの牛群データと理論給餌速度

	未給餌率 5%以上	1回あたりの 給餌量2.5kg以上
対象乳牛頭数[頭]	14	10
平均未給餌率[%]	20.7	17.6
平均設定給餌量[kg]	6.2	6.8
搾乳回数[回]	3.6	2.3
搾乳あたりの平均給餌量F[kg]	2.1	3.0
平均日乳量y[kg]	33.3	32.0
平均搾乳速度f[kg/min]	2.3	2.2
1回あたりの設定搾乳量k[kg]	11.5	13.5
前処理作業時間t ₁ [s]	106	106
理論給餌速度S[kg/min]	0.31	0.38

表 6-3 試験グループの設定給餌速度と未給餌率, 搾乳回数, 日乳量

頭数	設定給餌速度 [kg/min]	未給餌率 [%]	給餌量 [kg]	搾乳回数 [回]	搾乳あたりの給餌量 [kg]	日乳量 [kg]	平均搾乳速度 [kg/min]	
試験 1	11	0.55	12.0 ^a ±6.8	6.7 ^a ±1.1	2.8±0.3	2.4±0.3	35.2± 9.7	2.6±1.1
		0.75	2.4 ^b ±9.9	5.1 ^b ±1.4	2.5±0.4	2.1±0.7	32.8± 8.0	2.7±1.1
試験 2	12	0.55	18.4 ^c ±14.6	5.5±1.6	2.6±1.0	2.3±0.8	31.0± 9.9	2.6±1.1
		0.75	7.2 ^d ±11.8	5.6±1.2	2.3±0.5	2.5±0.6	30.8±11.9	2.5±1.0

a, b: p<0.05 c, d: p<0.05

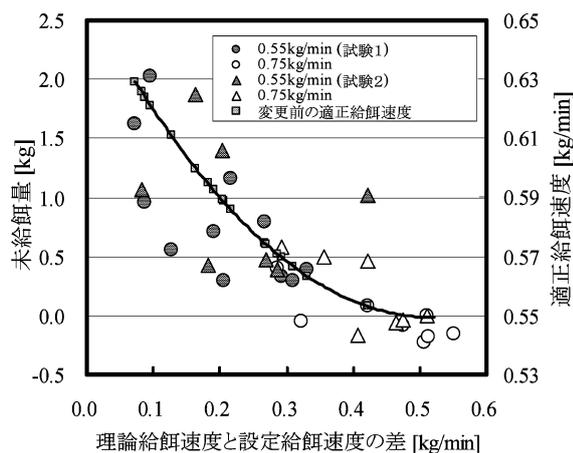


図 6-4 理論給餌速度と設定給餌速度の差と未給餌量, 速度変更前の適正給餌速度の関係

負の相関が認められ, 理論給餌速度に未給餌量を給餌するための適正な速度を計算すると, 設定値の 0.55 kg/min から 0.63 kg/min の給餌速度が必要であることがわかった。また理論給餌速度との間には平均 0.25 kg/min, 最大 0.43 kg/min の差が生じた。最大の差が生じた個体は搾乳の失敗が計測されており, 数理モデルではこれらの失敗時における給餌量まで考慮しておらず, これが差の生じた原因と考える。また理論給餌速度との差が 0.35 kg/min 以下においては, 前述した給餌量の上限値が 2.5 kg に設定されていたことで搾乳回数の少ない, あるいは設定給餌量の多い個体が未給餌量を増やす原因になったと考える。

自動搾乳システムでは不定時搾乳であるため, 給餌量は一定でなく, 搾乳の度に 1 日の設定給餌量を基に前回の搾乳からの時間に応じた給餌量が計算される。また, 1 日の設定給餌量のうち未給餌分を設定範囲内で翌日へ繰り越すことができ, 搾乳毎に給餌量は大きく異なることが予想される。給餌速度モデルで計算された理論給餌速度と一致しない理由にはこのような原因も考えられる。供試農場では 1 日 2.4 回程度の搾乳牛でも未給餌分の繰り越しが認められた。したがって給餌システムを正しく運用する

ためには, 未給餌が生じない適切な給餌量, 給餌速度の設定とともに, 期待どおりの搾乳回数を確保することも不可欠であり, 特に搾乳ストールへの進入回数が少なく, 1 日の実搾乳回数が 2 回以下となる乳牛の場合には注意が必要である。

6.3.2 システム稼働率

表 6-4 は, 自動搾乳システムを導入した 31 農場 (38 台) の記録データから牛群個体の日乳量, 平均搾乳速度, 1 回あたりの設定搾乳量のほか, これらを (5-6) 式に代入して求めた理論搾乳頭数と実搾乳頭数の割合で表した稼働率を求め, その高い順に示した。稼働率が最も高い農場 1 は牛群の平均日乳量 28.9 kg, 平均搾乳速度 2.37 kg/min, 設定搾乳量 11.5 kg であり, 理論搾乳頭数は約 73 頭と算出された。実搾乳頭数は 66 頭であったことから稼働率は 90.7% となった。供試の自動搾乳システムでは, 搾乳ストールの利用時間を示す 1 日の総搾乳時間の割合 (搾乳率) は 80~85% が適正であるとされている。これらをシステムの洗浄時間を除いた稼働率に換算すると 84~89% となることから, 農場 1 では実用能力限度の稼働率 90% を超えており, 利用中に搾乳ストール前で次の搾乳を待つ個体が生じるような過密なシステム運用状況であると判断できる。

農場 3 は農場 1 とほぼ同じ稼働率を示したが, 実搾乳頭数は 60 頭であった。これは牛群の設定搾乳量および実稼働時間が少ないために理論搾乳頭数も農場 1 と比べて少なくなった。また, 農場 3 と同じ実搾乳頭数の農場 9 は平均日乳量が 25.8 kg と農場 3 の 29.9 kg より少なく, 設定搾乳量は 12.1 kg と農場 3 の 10.5 kg よりも多いことから稼働率は 80.2% となり, 農場 9 では搾乳牛 7 頭程度の増頭が可能と言える。

理論搾乳頭数の全農場平均は 74.2 頭, 平均稼働率は 67% であった。なお, 試験研究機関の 3 農場 (27, 28, 31) を含む 7 農場 (8 台) においては理論搾乳頭数に対して実搾乳頭数が少ないために稼働率が 50% 以下と低かった。また平均日乳量, 平均搾乳速

表 6-4 自動搾乳システム導入農場の牛群泌乳データとシステム設定値, 理論搾乳頭数, 稼働率

農場	平均日乳量 y [kg]	平均搾乳速度 f [kg/min]	設定搾乳量 k [kg]	洗浄時間 [h]	実稼働時間 T_{Aw} [h]	理論搾乳頭数 N	実搾乳頭数	稼働率 [%]	導入後 月数
1	28.9	2.37	11.5	0.74	23.26	72.8	66	90.7	33
2	33.6	2.45	10.7	0.97	23.03	64.2	58	90.4	23
3	29.9	2.34	10.5	1.08	22.92	66.5	60	90.2	43
4a	29.8	2.04	10.6	0.71	23.29	62.2	56	90.0	47
5	25.3	2.26	11.1	1.68	22.32	76.2	66	86.6	36
6	28.6	2.58	11.1	1.47	22.53	74.1	63	85.0	37
7	26.4	2.41	8.9	1.14	22.86	74.9	63	84.1	53
4b	29.7	2.49	11.7	0.73	23.27	73.6	61	82.9	47
8	28.0	2.50	12.0	0.99	23.01	77.7	63	81.0	18
9	25.8	2.09	12.1	1.21	22.79	74.8	60	80.2	22
10	33.5	2.85	15.1	1.18	22.82	79.3	63	79.4	21
11	31.6	2.42	13.7	1.27	22.73	70.1	55	78.5	42
4c	27.7	2.23	10.3	0.71	23.29	70.0	54	77.1	47
12a	29.7	2.53	10.2	1.82	22.18	67.0	51	76.2	16
13a	31.0	2.70	11.0	0.80	23.20	75.3	57	75.7	22
12b	30.9	2.48	11.1	1.96	22.04	65.5	48	73.3	16
14	26.1	2.46	9.5	1.01	22.99	75.6	55	72.8	32
15	27.2	2.47	12.5	0.89	23.11	81.4	58	71.3	24
16a	27.3	2.30	13.1	1.21	22.79	77.4	54	69.8	14
17	31.0	2.95	12.1	1.51	22.49	76.4	53	69.4	35
18	25.6	2.41	10.9	1.15	22.85	79.7	54	67.7	28
4d	27.1	2.32	11.3	0.76	23.24	76.0	51	67.1	47
19	37.3	2.91	13.4	1.58	22.42	68.1	44	64.6	26
16b	22.9	2.21	11.3	0.87	23.13	86.9	56	64.4	14
20	25.6	2.20	11.3	1.25	22.75	76.1	49	64.4	12
21	26.4	2.44	11.0	0.97	23.03	82.4	52	63.1	29
13b	26.5	2.25	11.4	0.76	23.24	79.4	50	63.0	22
22	26.1	2.40	11.0	1.19	22.81	81.4	50	61.4	21
23	21.6	2.30	9.3	1.23	22.77	86.1	52	60.4	44
24	27.3	2.66	12.6	1.15	22.85	84.2	45	53.4	31
25	25.2	2.19	10.4	1.05	22.95	78.7	38	48.3	25
26	27.2	2.16	8.3	1.22	22.78	62.8	27	43.0	30
27	38.9	2.32	12.0	1.99	22.01	51.2	22	42.9	41
28	38.5	2.10	10.0	1.16	22.84	47.3	20	42.3	7
29a	23.4	2.10	10.5	1.24	22.76	81.8	30	36.7	27
30	23.1	2.35	8.9	1.04	22.96	80.8	28	34.7	22
31	35.3	3.04	13.4	1.35	22.65	71.6	24	33.5	51
29b	24.3	2.51	12.0	1.48	22.52	91.9	29	31.6	27
平均	28.5	2.42	11.3	1.17	22.83	74.2	50	67.0	30

注) 同一農場で複数頭の搾乳ストールが設置してある場合はa~dで示した。

度, 設定搾乳量, 実稼働時間の全農場平均はそれぞれ 28.5 kg, 2.42 kg/min, 11.3 kg, 22.83 時間となった。これらの平均値と第 5 章で述べた A システムの搾乳を除く搾乳作業時間を (5-6) 式に代入して理論搾乳頭数を求め, 以下に述べる各農場牛群との比較においては, これを供試した自動搾乳システムの標準モデルとした。

図 6-5 は表 6-4 に示した各農場牛群の平均日乳量と設定搾乳量の分布を示し, さらに丸印の大きさで各農場の牛群データから算出された理論搾乳頭数を

表した。また, 図中の曲線は (5-6) 式を変形して標準モデルにおける理論搾乳頭数の平均日乳量と設定搾乳量との関係を示した。どちらの理論搾乳頭数も実用能力限度の稼働率 90% 時の頭数で示した。平均日乳量が多く, 設定搾乳量が少ないほど標準モデルの理論搾乳頭数は減少し, また農場毎に算出した理論搾乳頭数 (丸印の大きさ) も減少した。平均日乳量が 35 kg を超えた場合, 稼働率 90% 時の理論搾乳頭数が 60 頭未満となる農場もあったが, ほとんどの農場においては 60~80 頭の搾乳が可能であり,

それらの農場の平均日乳量は 22~35 kg, 設定搾乳量は 8~15 kg の範囲にあることが示された。

図 6-6 は同様に各農場牛群の平均搾乳速度と実稼働時間の分布を示し, さらに各農場の理論搾乳頭数を丸印の大きさで表した。また, 曲線は標準モデルにおける理論搾乳頭数の平均搾乳速度と実稼働時間との関係を示した。各農場の牛群平均値は平均搾乳速度が 2.04~3.04 kg/min, 実稼働時間は 22.0~23.3 時間の範囲にあった。しかし, 平均搾乳速度と実稼働時間の分布が示す範囲では稼働率 90% 時の理論搾乳頭数が 60 頭未満となる農場はなく, 平均搾乳速度と実稼働時間が理論搾乳頭数に及ぼす影響は少ないと考える。

各農場における牛群平均値とその分布の結果から, 設定搾乳量が標準モデルの 11.3 kg とすると, 日乳量 22~39 kg の範囲で理論搾乳頭数は 48~85 頭まで 37 頭変化した。同様に平均搾乳速度 2.04~3.04 kg/min, 設定搾乳量 8~15 kg, 実稼働時間 22.0~23.3 時間の範囲からは, それぞれ 16 頭, 15 頭, 4 頭変化し, 自動搾乳システムにおける理論搾乳頭数を増減させる最大の要因は牛群の平均日乳量であると示された。しかし, 自動搾乳システムの運用において理論搾乳頭数を増加させるために牛群の平均日乳量あるいは平均搾乳速度を操作することは不可能である。この場合, 乳牛の搾乳回数を減らし, 設定搾乳量を増す以外に搾乳可能な頭数を増加させる方法はない。農場 7 の場合, 牛群平均日乳量が 26.4 kg で設定搾乳量は 8.9 kg であるが, 設定搾乳量を 12.5 kg とすることによって理論搾乳頭数は 85 頭と 10 頭増え, 稼働率も 81.4% から 74.4% に減

少する。

図 6-7 は各農場の稼働率と設定搾乳量の分布を示し, さらに丸印の大きさで各農場の実搾乳頭数を表した。また, 図中の曲線は標準モデルにおける理論搾乳頭数の稼働率と設定搾乳量との関係を示した。稼働率は理論搾乳頭数に対する実搾乳頭数の割合であるため, 実搾乳頭数の多い農場ほど高い稼働率を示すことになる。標準モデルの設定搾乳量 8~16 kg の範囲において, 稼働率 100% の理論搾乳頭数は 63~82 頭, 稼働率 90% では 57~74 頭の範囲となる。すなわち稼働率 90% において設定搾乳量によって搾乳頭数を 17 頭程度増減できる。したがって実搾乳頭数が多く, やや過密なシステム運用状況となる稼働率 90% をわずかに超えた 4 農場の場合, 図の理論搾乳頭数曲線に沿って牛群の設定搾乳量を 1 kg 増

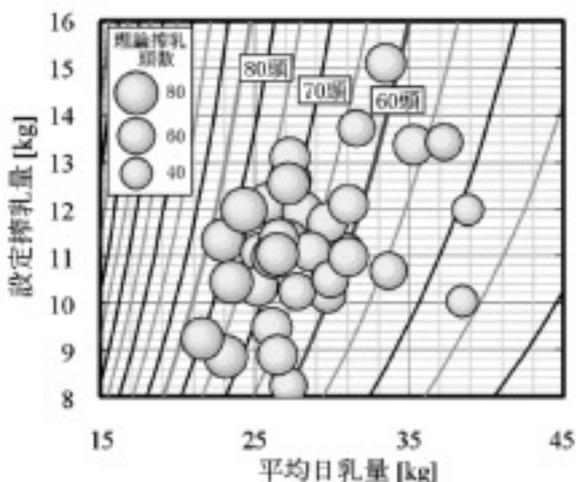


図 6-5 各農場の平均日乳量, 設定搾乳量と稼働率 90% 時の理論搾乳頭数 (曲線は標準モデルの稼働率 90% 時, 理論搾乳頭数)

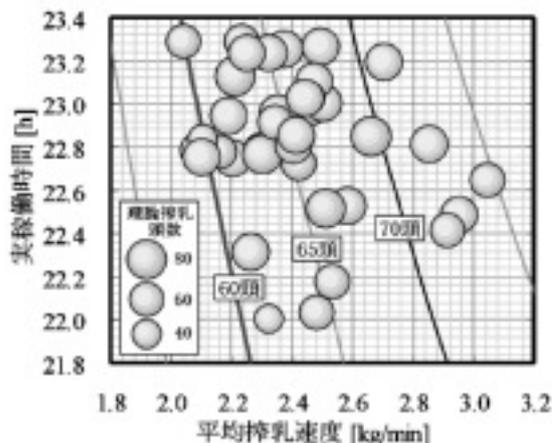


図 6-6 各農場の平均搾乳速度, システム稼働時間と稼働率 90% 時の理論搾乳頭数 (曲線は標準モデルの稼働率 90% 時, 理論搾乳頭数)

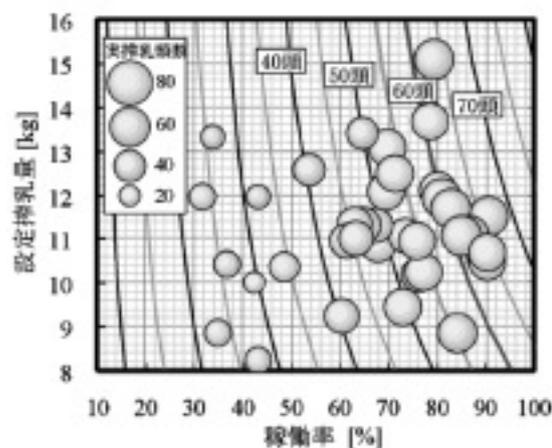


図 6-7 各農場の稼働率, 設定搾乳量と実搾乳頭数 (曲線は標準モデルの稼働率 100% 時, 理論搾乳頭数)

すと稼働率は90%から87%に、2 kg 増すと85%に稼働率は減少することが示された。また、実搾乳頭数が多く稼働率の高い状況ほど、設定搾乳量の変更で稼働率を大きく変えることができ、過密なシステム運用状況において搾乳頭数はそのままに稼働率のみを低下させることが可能と言える。

始めにも述べたが自動搾乳システムは乳牛の自発的行動による自由搾乳であるため、ストールへの進入回数が少なく、特に1日の搾乳回数が2回以下となる搾乳牛の場合には本研究の結果が示すようにストール内での給餌や搾乳能率の数理的モデルとの間にずれが生じるので家畜管理上の注意が必要である。また、自動搾乳システムの実搾乳回数と設定搾乳回数との間には乖離の存在³⁶⁾が明らかにされているが、これらを考慮したうえで本研究が提示した給餌や搾乳能率の数理モデルから給餌速度や搾乳回数、搾乳量などを設定し、さらに搾乳ストールへの入退出が円滑に行えるような牛舎内配置など、搾乳牛に対する十分な自発的搾乳条件が満たされているならば、自動搾乳システムの最適な運用が実現できると考える。

6.4 摘要

自動搾乳システムにおける搾乳ストール内での給餌速度の数理的モデルに関して検証試験を実施し、さらに搾乳能率の数理的モデルから自動搾乳システムを導入した31農場の記録データを解析、比較して、システムの効率的運用を図るための改善方法について検討した。試験の結果、以下の結論を得た。

1) 自動搾乳システムは不定時の搾乳であるため、未給餌量が翌日へ繰り越されるなどの原因により給餌速度の数理的モデルとの間に誤差が生じた。未給餌量を減らすためにはシステムの理論給餌速度よりも平均0.25 kg/min、最大0.43 kg/min 速くすることが必要であった。1回あたりの給餌量が増えるため、給餌システムを正しく運用するためには1日2回以上の搾乳が必要である。

2) 自動搾乳システムにおける理論搾乳頭数を増減させる最大の要因は牛群の平均日乳量であることが明らかとなった。また、実用能力限度の稼働率90%を超えた4農場の場合、設定搾乳量を2 kg 増すと稼働率は85%に減少することが示された。搾乳頭数が多く稼働率の高い状況ほど、わずかな設定搾乳量の変更で搾乳頭数は変更せずに過密なシステム運用条件の改善が可能と考える。

第7章 総括

搾乳は酪農労働の中でも人的労働に依存する部分が多い。しかし、自動搾乳システムは作業の複雑さから自動化が遅れている搾乳労働からの解放を可能にした。本論文はシステム導入後の運用面において、その能率を最大限に発揮させるために必要とされる搾乳回数あるいは搾乳量の設定など牛群の泌乳性に配慮した最適利用技術や搾乳効率に影響を及ぼす要因を明確にした。

7.1 慣行搾乳システムにおける作業者の労働負担 (第2章)

現在の搾乳方式における搾乳作業者の労働負担量を把握し、搾乳方式が自動搾乳システムへと変化した場合の労働負担の軽減について明らかにした。パイプラインとロータリバーラにおいて、搾乳作業時の作業姿勢と心拍数、呼吸数から労働負担を評価し、さらに実験室内のパイプラインミルクにより4つの搾乳モデルで搾乳シミュレーションを行い、パイプライン搾乳における労働負担の要因となる作業内容や姿勢について検討した。

その結果、パイプライン方式における作業者の姿勢は前処理やユニットの取り付け、取り外し時に膝の曲げ、腰の屈曲など大きな角度変化が認められた。一方、バーラ方式では膝、腰の角度に大きな変化はないが取り付け作業者の上腕を上げる頻度はパイプライン方式よりも多いことが観察された。またバーラでの作業者の消費エネルギー変化はパイプラインでの作業者に比べ少なかった。RMR、心拍数増加率はそれぞれパイプライン作業が平均5.3、67.1%とバーラ作業の平均3.7、29.0%に比べ高く、またパイプラインでの作業者の消費エネルギーは作業の経過とともに次第に増加した。

搾乳シミュレーションではステップ較正值の最大はControl、Cartモデルに比べACRモデルの労働負担量が少なくなり、Parlorモデルでは較正值平均34、最大値66と他の搾乳モデルよりもさらに負担量が少ないことを示した。ACRモデルにおいて自動離脱の使用により膝を曲げる作業姿勢はParlorを除く他の2つのモデルより6%程度少なくなった。ControlおよびACRモデルの両方とも、ユニット移動を行った直後の心拍数は大きく、ユニットの移動による負担量に有為な差 ($P < 0.05$) が認められた。

慣行搾乳システム、特にパイプライン方式での搾乳労働は起立から蹲踞へと大きく姿勢が変わる場合やユニットの運搬時に作業者の負担が大きく、特に

作業者が高齢である場合は心拍数の増加よりも最高血圧の上昇を伴うので心臓への負担も大きいと考えられる。また、自動搾乳システムはパーラ方式と比較して半分以下の管理作業時間であることが示されており、後継者の不足から高齢化が進むこれからの酪農において、搾乳労働負担の軽減を実現するであろうことが証明された。

7.2 乳牛の乳房形状と自動搾乳システムへの適合性（第3章）

自動搾乳システムでは毎日の搾乳作業労働が大幅に軽減されるが、一方で搾乳シーケンスが正常に終了できなかった搾乳失敗牛が発生すると、追い込みや搾乳機装着の人為的介助が必要になり、システムの効率に影響を及ぼす。そこで搾乳失敗の原因と考えられる乳牛の乳房形状や乳房座標を調査、測定し、各個体の搾乳ロボットへの適合性を調べた。さらに自動搾乳システム移行後の搾乳成功率からこれらの適合性を検証した。

その結果、自動搾乳システム導入の3農場における乳牛の乳房間隔は、産次が進むと前後の間隔については有意($P < 0.01$)に増加した。また最低乳房高さは産次が進むと有意($P < 0.01$)に減少した。自動搾乳システムを導入する予定の農場における初産牛の51%が、2産では38%が、3産以上では69%が推奨条件で搾乳ロボットに適合しなかったが、自動搾乳システムを導入した3農場の牛群を基にした実際条件では不適合の割合が大幅に減少した。また、搾乳ロボットに適合しない主な要因は前左右の乳房間隔や左右あるいは前後の乳房高低差であることが判明した。

自動搾乳システム移行前の調査で適合性が高かった個体は、移行後の搾乳成功率が90%を超え、適合性の低かった個体の中で3頭は成功率が90%を超える結果となった。しかし、その他の個体は成功率が低かったことから適合性の判定は正当であったと評価できる。このことから自動搾乳システムを導入する際の乳牛選定により搾乳失敗の割合を減らし、システム効率の向上が可能と考える。

7.3 乳牛の乳房位置座標の経日、経年変化や搾乳ストール内滞在が自動搾乳システムの運用に及ぼす影響（第4章）

乳牛の乳房位置、乳房間隔は分娩後日数や産次によって変化することから、第3章で明らかにできなかった産次や泌乳期間により乳房位置、乳房間隔の経時変化が自動搾乳システムの運用に及ぼす影響を

調べた。また、乳牛の搾乳ストールへの進入、退出時間の解析から遅延を引き起こす要因を調べ、システム稼働率を低下させる退出遅延を改善するために音刺激による乳牛退出装置を試作してその効果を検証した。

その結果、搾乳機の装着失敗の原因となる乳房間隔の泌乳期間における変化量は初産次では大きくないが、産次を重ねて乳量が増え、分娩後42日目以降の乳量変化量が大きくなる3産次に乳房間隔の変化量は最大となった。各乳房間隔の中では前左右の変化量が最も大きく100日間で20mm以上減少する個体も認められることから、間隔の減少によって引き起こされる搾乳失敗に注意が必要である。また、乳量と各乳房間隔の変化量との間に相関が認められ、日乳量から乳房間隔の変化を推定することが可能と考える。

搾乳ストールへの進入時間は、進入動機の1つである飼槽への給餌時刻や給餌回数によって異なり、また前回の搾乳から数時間が経過して搾乳が行われる場合と通過の場合では動機の違いから時間に差が生じた。しかし、ストール内での濃厚飼料の給餌量や搾乳量は、各個体の進入および退出時間に影響を及ぼさなかった。音刺激による退出装置は開始後4日目までに退出時間が短縮した。以上から自動搾乳システムの運用において乳房間隔の変化量から搾乳失敗を予測し、搾乳ストールへの進入動機である飼槽への給餌時刻や回数を適切に設定することで効率の改善を図ることができる。

7.4 自動搾乳システムの搾乳能率に関する数理解析（第5章）

自動搾乳システムの効率的運用を図るためには搾乳能率の算出が必要であるが、自動搾乳システムの場合は24時間不定時搾乳であるため、算出について従来とは異なる考え方が必要である。そこで乳牛の搾乳速度、乳量や搾乳回数の設定、搾乳システムの洗浄時間など自動搾乳システムが記録する牛群の泌乳性に関わる項目と各機種種の機械的作業時間の計測によりこれらをパラメータとした搾乳能率（理論搾乳頭数）の数理的モデルを提案した。数理的モデルの構築にあたり、3機種5農場で24時間、自動搾乳システムの搾乳作業時間を測定し、またシステムの洗浄間隔を変えて、実稼働時間を調査した。

その結果、構築した数理的モデルを用いて、乳牛の日乳量、平均搾乳速度、1回あたりの搾乳量など牛群の泌乳性が変わる個別の農場毎に、また異なる自動搾乳システムにおいても、搾乳能率を正しく評

価することが可能になった。

自動搾乳システムの理論搾乳頭数は、牛群平均搾乳速度が 2 kg/min から 3 kg/min に増えると 23~28%増加し、平均日乳量が 24 kg から 34 kg に増えると 29~30%減少した。さらに設定搾乳量を 8 kg から 14 kg に変えると、理論搾乳頭数は 21~32%増加した。またシステムの洗浄間隔を変更することで実稼働時間は 1.3~1.5%変化したが、これによる理論搾乳頭数の変化は約 3%とその影響は僅かであることが判明した。

以上から自動搾乳システムでは群毎にあるいは個体毎に設定した搾乳回数とそれぞれの泌乳能力データを得ることが可能なので、より正確な搾乳能率の数理モデルを作成できることが示された。搾乳頭数が理論搾乳頭数に近づき、搾乳ストールの利用率が上昇すると、乳牛の採食行動に影響が生じる場合があるので、これを考慮した最適なシステム運用が必要とされた。

7.5 自動搾乳システムの運用における最適化(第6章)

自動搾乳システムにおいて乳牛の搾乳速度、給餌量や搾乳量の設定などから搾乳ストール内での給餌速度の数理モデルを構築し、検証試験を実施した。また第5章で提案した搾乳能率の数理モデルを用いて自動搾乳システムを導入した 31 農場の記録データを解析、比較し、牛群の泌乳能力や搾乳回数の設定が異なる農場のシステム運用を最適化するための方法について検討した。

その結果、自動搾乳システムは不定時の搾乳であるため、未給餌量が翌日へ繰り越されるなどの原因により給餌速度の数理モデルとの間に誤差が生じた。未給餌量を減らすためにはシステムの理論給餌速度よりも平均 0.25 kg/min、最大 0.43 kg/min 速くすることが必要であった。また搾乳回数が減少すると 1 回あたりの給餌量が増えるため、給餌システムを正しく運用するためには 1 日 2 回以上の搾乳が推奨される。

自動搾乳システム導入農場における搾乳記録データの解析から理論搾乳頭数を増減させる最大の要因は牛群の平均日乳量であることが明らかとなった。また、実搾乳頭数が多く、やや過密なシステム運用状況と言える稼働率 90%を超えた 4 農場の場合、設定搾乳量を 2 kg 増すと稼働率は 85%に減少することが示された。搾乳頭数が多く稼働率の高い状況ほど、わずかな設定搾乳量の変更で搾乳頭数は変更せずにシステム運用条件の改善が可能であった。

自動搾乳システムは乳牛の自発的行動による自由搾乳であるため、ストールへの進入回数が少なく、特に 1 日の搾乳回数が 2 回以下となる搾乳牛の場合には本論文で提示したストール内での給餌や搾乳能率の数理モデルとの間にずれが生じる。しかし、搾乳ストールへの入退出が円滑に行えるような牛舎内配置など、搾乳牛に対する十分な自発的搾乳条件が満たされているならば、これらの数理モデルを用いて自動搾乳システムを利用する個別の農場毎に運用を計画し、自動搾乳システムの最適化が可能であることを確認した。

量記号一覧

A	: 被験者の年齢
a	: 年齢係数 $\begin{cases} 1.18 & (20 \leq A \leq 29) \\ 1.14 & (30 \leq A \leq 39) \\ 1.03 & (40 \leq A \leq 49) \\ 0.99 & (50 \leq A) \end{cases}$
C	: 基礎代謝量基準値 [kcal/m ² h]
E_B	: 基礎代謝量 [kcal/min]
E_R	: 安静時の消費エネルギー [kcal/min]
E_W	: 作業時の消費エネルギー [kcal/min]
F	: 自動搾乳システムにおける搾乳 1 回あたりの設定給餌量 [kg]
f	: 牛群平均搾乳速度 [kg/min]
H	: 被験者の身長 [cm]
HR_R	: 安静時心拍数 [beat/min]
HR_W	: 作業時心拍数 [beat/min]
k	: 自動搾乳システムにおける 1 回あたりの設定搾乳量 [kg]
N	: 自動搾乳システムの理論搾乳頭数 [頭]
n	: 自動搾乳システムにおける 1 日の平均搾乳回数 [回]
r	: 乳頭半径 [mm]
S	: 自動搾乳システムの理論給餌速度 [kg/min]
S_A	: 被験者の体表面積 [m ²]
T	: 自動搾乳システムにおける乳牛 1 頭あたりの搾乳作業時間 [s]
T_{AW}	: 自動搾乳システムにおける 1 日あたりの実稼働時間 [h]
T_f'	: 自動搾乳システムにおける配合飼料給餌時間 [min]
T_m'	: 自動搾乳システムにおける 1 回あたりの平均搾乳作業時間 [s]
t'	: 自動搾乳システムにおける平均搾乳時間 [s]
t_t	: 自動搾乳システムにおける搾乳を除く平均搾乳作業時間 [s]

- t_2 : 自動搾乳システムにおける搾乳前処理作業時間 [s]
 x_m : 検出障害になる場合の右前乳頭 X 座標 [mm]
 x_{rf} : 右前乳頭 X 座標 [mm]
 x_{rr} : 右後乳頭 X 座標 [mm]
 y : 牛群平均日乳量 [kg]
 y_m : 検出障害になる場合の右前乳頭 Y 座標 [mm]
 y_{rf} : 右前乳頭 Y 座標 [mm]
 y_{rr} : 右後乳頭 Y 座標 [mm]
 W : 被験者の体重 [kg]
 α : 前後乳頭間距離 [mm]
 β : レーザ中心から後ろ乳頭までの距離 [mm]
 θ : レーザの Y 軸に対する後ろ乳頭位置角 [$^{\circ}$]

謝 辞

本論文は、1995～2003年に酪農学園大学附属農場を始めとし、元酪農学園植苗農場、(有)コーンズ・エコファームおよび北海道夕張郡由仁町三谷牧場ほか、調査農場の協力を得て行われた研究をまとめたものである。

本論文をまとめるにあたり、帯広畜産大学畜産学部 松田清明教授には終始懇切なるご指導とご助言をいただいた。また、弘前大学農学生命科学部 高橋照夫教授、岩手大学農学部 武田純一助教授、帯広畜産大学畜産学部 佐藤禎稔助教授には本論文のご校閲とご助言をいただいた。酪農学園大学酪農学部 川上克己教授には研究者としての機会を与えていただき、研究活動全般にわたり懇切なるご指導をいただいた。ここに心より深謝の意を表す。

本研究を進めるにあたっては、多くの方のご協力と激励をいただいた。(独)農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター 福森 功元畜産工学研究部長、同 八谷 満主任研究員には研究初期に多くの貴重な資料をいただいた。乳牛の乳頭位置座標の計測においては、三谷牧場 三谷孝裕氏より3年間にわたり自動搾乳データをご提供いただき、また自動搾乳システムの運用に関する有益なご助言をいただいた。自動搾乳システムの実稼働時間の計測においては、北海道紋別郡興部町(有)卯城牧場 卯城正志氏、北海道江別市五十嵐牧場 五十嵐澄雄氏よりご協力をいただいた。自動搾乳システムの給餌速度モデルの実証試験においては、試験農場の(有)コーンズ・エコファーム 元ファームマネージャー 横山 守氏、(株)コーンズ・エージー 谷 聖一氏より多大なるご協力とご助言をいただいた。また、自動搾乳シ

ステム導入農場における運用データの調査、解析には、元酪農総合研究所 時田正彦研究員(現(株)オーレンス)、畠山尚史研究員(現明治飼糧(株))、(独)農研機構 畜産草地研究所 喜田環樹研究員ほか、多くの酪農場のご協力をいただいた。酪農学園大学酪農学部 森田 茂教授には乳牛行動を含め自動搾乳システム全般に関する多くのご教示をいただいた。また、酪農学園大学附属農場職員各位には搾乳労働負担に関する試験から自動搾乳システムの運用面に至るまで貴重なご意見やご協力をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表す。

末尾ながら、本研究が関係各位の多大なるご支援によりここにあることを記して、改めて心より感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 新井澄男, 金子七五三, 瀬川 敬, 酒井 学: 畜舎における作業姿勢(第1報), 農作業研究, 8, 4-9, 1969.
- 2) 新井澄男, 瀬川 敬, 塩谷哲夫, 今泉七郎: 畜舎における作業姿勢(第2報), 農作業研究, 13, 60-64, 1971.
- 3) 新井澄男, 塩谷哲夫, 今泉七郎, 糸川信弘, 高木清継, 薬師堂謙一: 酪農作業に関する調査研究 第6報タイムスタディーによる搾乳作業の解析(調査・解析方法, 作業時間, 作業の分類), 農作業研究, 49, 27-35, 1983.
- 4) Artmann, R. and D. Schillingmann: Entwicklungsstand von Melkrobotern, Landtechnik, 45, 437-440, 1990.
- 5) 畜産技術協会編: 自動搾乳システム実用化平成12年度報告書, 社団法人畜産技術協会, 東京, 93-95, 2001.
- 6) 畜産技術協会編: 自動搾乳システム実用化マニュアル, 社団法人畜産技術協会, 東京, 1-12, 2003.
- 7) 畜産技術協会編: 自動搾乳システム実用化マニュアル, 社団法人畜産技術協会, 東京, 31-40, 2003.
- 8) Cooper, K. and D.J. Parsons: A simulation model of an automatic milking system applying different management strategies, J. Agric. Engng. Res., 69, 25-33, 1998.
- 9) Delwiche, M.J., N.R. Scott and C.J. Drost: Ultrasonic measurement of teat milk flow, TRANSACTIONS of the A.S.A.E., 23, 746-752, 1980.

- 10) Duck, M.: Evolution of duvelsdorf milking robot, Proc. of International Symposium on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publication 65, Wageningen, The Netherlands, 49-54, 1992.
- 11) Espada, E. and H. Vijverberg: Milk color analysis as a tool for the detection of abnormal milk, Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking, Toronto, Canada, IV · 28-38, 2002.
- 12) 榎藤昭博, 長谷川三喜, 我妻幸雄: シミュレーション手法による搾乳施設作業能率の解析 (第1報) — ロータリ・パーラの場合 —, 農業機械学会誌, 47 (4), 485-492, 1986.
- 13) 榎藤昭博, 長谷川三喜, 我妻幸雄: シミュレーション手法による搾乳施設作業能率の解析 (第2報) — スタティック・パーラの場合 —, 農業機械学会誌, 48 (3, 4), 369-375, 1986.
- 14) Guest, R.W.: A partial review of the early history and development of the milking machine, Proc. of the Milking System and Milking Management Symposium, Harrisburg, USA, 3-10, 1988.
- 15) 八谷 満, 平田 晃, 市戸万丈: 搾乳ロボットシステムの設計評価に関する基礎研究 (第1報) — ホルスタイン種泌乳牛の乳頭配置の経時的変動 —, 日本家畜管理学会誌, 35 (3), 55-64, 2000.
- 16) 八谷 満, 古山隆司, 福森 功, 市戸万丈, 平田 晃, 桑名 隆: 搾乳ロボットシステムの設計評価に関する基礎研究 (第2報) — 牛体構造から求められる機械系の作業域と基本機構の検討 —, 日本家畜管理学会誌, 36 (3), 115-127, 2000.
- 17) 八谷 満, 平田 晃, 桑名 隆, 荊木義孝, 比佐慶夫: 繋ぎ飼いで用いた搾乳ロボットシステムの開発 (第1報) — ティートカップ装着に向けたシステム構成と動作計画の概念 —, 農業機械学会誌, 63 (2), 109-117, 2001.
- 18) Halachmi, I., J.H.M. Metz, E. Maltz, A.A. Dijkhuizen, L. Speelman: Designing the optimal robotic milking barn, part 1: Quantify facility usage, J. Agric. Engng. Res., 76, 37-49, 2000.
- 19) Halachmi, I.: Designing the optimal robotic milking barn, part 2: Behaviour-based simulation, J. Agric. Engng. Res., 77(1), 67-79, 2000.
- 20) Hillerton, J.E., C.H. Knight, A. Turvey, S.D. Wheatley and C.J. Wilde: Milk yield and mammary function in dairy cows milked four times daily, J. Dairy Res., 57, 285-294, 1990.
- 21) 廣瀬可恒, 鈴木省三編: 泌乳生理と搾乳, 新編酪農ハンドブック, 養賢堂, 東京, 483-529, 1990.
- 22) Hogewerf, P.H., P.J.M. Huijsmans, A.H. Ipema, T. Janssen and W. Rossing: Observations of automatic teat cup attachment in an automatic milking system, Proc. of International Symposium on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publication 65, Wageningen, The Netherlands, 80-90, 1992.
- 23) 北海道乳牛検査協会編: 乳牛の泌乳曲線, 生乳生産予測基礎分析資料, 社団法人北海道乳牛検査協会, 1989.
- 24) 北海道農林水産統計事務所編: 北海道農林水産統計年報 (農畜産物生産費・農林物価編) 昭和60年~平成6年, 札幌, 1986~1995.
- 25) 北海道立根釧農業試験場酪農施設科編: 搾乳ロボットの開発に関する研究, 平成元年度酪農施設機械研究成績書, 北海道立根釧農業試験場酪農施設科, 38-75, 1989.
- 26) 干場秀雄, 米田浩泰, 池滝 孝, 新出陽三, 奥島 正, 平山森一, 天池伸三: 自動搾乳システムによる一日3回搾乳の搾乳作業状況について, 日本家畜管理学会誌, 32 (2), 53-60, 1996.
- 27) 干場秀雄, 梅津一孝, 高畑英彦: 自動搾乳システムの搾乳能率, 農業機械学会誌, 58 (4), 105-114, 1996.
- 28) 干場秀雄, 出田 大, 梅津一孝: 搾乳ロボットの搾乳性能に及ぼす要因, 日本家畜管理学会誌, 34 (2), 61-68, 1998.
- 29) 干場秀雄, 梅津一孝: 馬場牧場におけるL社製搾乳ロボットの特徴とその稼働状況について, 日本家畜管理学会誌, 35 (2), 47-52, 1999.
- 30) 干場秀雄: 搾乳ロボットの搾乳性能に及ぼす要因とその普及の可能性, 農業機械学会誌, 63 (1), 100-105, 2001.
- 31) 干場秀雄, 梅津一孝: 田中牧場での半年間の搾乳ロボットの稼働状況, 農業機械学会誌, 63 (3), 141-146, 2001.
- 32) 干場秀雄, 高橋千絵, 村井友紀: 興部町卯城牧場での搾乳ロボット稼働状況, 日本家畜管理学会誌, 37 (3), 112-120, 2002.
- 33) Ipema, A.H., E. Benders and W. Rossing: Effects of more frequent daily milking on

- production and health of dairy cattle, Proc. of the Third Symposium Automation in Dairying, Wageningen, The Netherlands, 283-293, 1987.
- 34) 泉 賢一, 森田 茂, 小宮道士, 泉 賢一, 野英二: 自動搾乳システム飼養下の高泌乳牛群における飼料設計と乳生産の関係, 北海道畜産学会報, 44, 39-45, 2002.
 - 35) 金 浩春, 林 尚孝, 森泉昭治: ステップテストにおけるステップ高さと昇降速度が心拍数に及ぼす影響, 農作業研究, 33 (3), 147-153, 1998.
 - 36) 影山杏里奈, 森田 茂, 村上絢野, 河上博美, 小宮道士, 干場信司, 時田正彦: 乳牛の自動搾乳システム利用性および設定搾乳回数と実搾乳回数の乖離, 北海道畜産学会報, 46, 53-57, 2004.
 - 37) 柏村文朗, 須田 潤, 古村圭子, 日高 智, 瀬尾哲也, 池滝 孝: 新設した自動搾乳システムにおける搾乳ボックスへの乳牛の馴致訓練, 日本畜産学会報, 72 (8), J 266-J 273, 2001.
 - 38) 河端真一, 干場秀雄: 分散型制御方式を導入した自動搾乳システムの開発, 日本家畜管理学会誌, 37 (4), 157-164, 2002.
 - 39) 河部弘道, 新家 憲, 大村良治: アスバラガス収穫用電動搬送カートの開発 (第1報), J. of Environ. Sci. Lab., Senshu University-Hokkaido, 4, 83-88, 1995.
 - 40) 喜田環樹, 市戸万丈, 森田 茂, 小宮道士, 寺脇良悟, 干場信司, 岩崎和広: 自動搾乳システム運用データ解析手法の検討, 酪農学園大学紀要, 26 (2), 265-269, 2002.
 - 41) 喜田環樹, 森田 茂, 小宮道士, 泉 賢一, ツェンコヴァ ルミヤナ, 八谷 満: 国際シンポジウム "The First North American Conference On Robotic Milking", 日本家畜管理学会誌, 38 (3), 141-146, 2002.
 - 42) 小林 恭: 作業姿勢のセンシングと計測技術, 農作業研究, 29 (3), 249-251, 1994.
 - 43) 小堀 乃, 倉田久治, 坂上 修, 古谷 正, 山川 勇, 安部勇徹: 脈はく数による農作業労働の評価について, 農作業研究, 40, 1-8, 1980.
 - 44) 小宮道士, 川上克己: 自動搾乳装置開発のための基礎研究 — 画像処理による乳頭位置の検出 —, 農業機械学会誌, 56 (3), 85-92, 1994.
 - 45) Koning, K. and W. Ouweltjes: Maximising the milking capacity of an automatic milking system, Proc. of the International Robotic Milking Symposium, Lelystad, The Netherlands, 38-46, 2000.
 - 46) Koning, K. and J. Rodenburg: Automatic milking: State of the art in Europe and north America, Proc. of Automatic Milking? a better understanding, Lelystad, The Netherlands, 27-37, 2004.
 - 47) 桑名 隆, 久保田興太郎, 小川浄寿, 福森 功, 道宗尚昭, 野附 巖, 上野克美, 市川忠雄, 興津善徳: 半自動搾乳装置の試作研究, 農業機械化研究所報告, 15, 57-74, 1981.
 - 48) Linde, R. and J. Lubberink: Robot Milking System (RMS): Design and Performance, Proc. of International Symposium on Prospects for Automatic Milking, EAAP Publication 65, Wageningen, The Netherlands, 55-79, 1992.
 - 49) Lowe, F.R.: Automation: In Milking Machines, Pergamon Press, Oxford, UK, 157-158, 1981.
 - 50) Miller, R.H., L.A. Fulton, B. Erez, W.F. Williams and R.E. Pearson: Variation in distances among teats of Holstein cows: Implications for automated milking, J. Dairy Sci., 78, 1456-1462, 1995.
 - 51) 森田 茂, 小宮道士, 泉 賢一, 及川健司, 干場信司: 自動搾乳システム牛舎への乳牛の導入後日数に伴う自動搾乳機および牛舎内施設利用性の変化, 酪農学園大学紀要, 26 (1), 57-61, 2001.
 - 52) 森田 茂, 菲澤栄樹, 杉田慎二, 干場信司, 小宮道士, 平山秀介, 時田正彦, 植竹勝治: 自動搾乳機および自動給餌機を用いた酪農現場における管理作業時間, 日本家畜管理学会誌, 37 (2), 75-80, 2001.
 - 53) 森田 茂, 時田正彦, 平山秀介, 小宮道士, 干場信司, 高瀬博志: 自動搾乳システムを活用したフリーストール牛舎の設計(1), 畜産の研究, 55 (7), 753-757, 2001.
 - 54) 森田 茂, 小宮道士, 泉 賢一, 中島 恵, 影山杏里奈, 川岸孝博, 及川健司, 長瀬 隆, 干場信司: 自動搾乳システムへの乳牛の導入条件が自動搾乳機への牛追い回数に及ぼす影響, 酪農学園大学紀要, 29 (2), 161-164, 2005.
 - 55) Mottram, T.T., D.L.O. Smith and R.J. Godwin: Development of an improved automatic cluster removal system for dairy animals, J. Agric. Engng. Res., 49, 73-84, 1991.

- 56) Mottram, T.T.: Passive methods of modifying cow posture for automated and robotic milking system, *J. Agric. Engng. Res.*, 52, 285-293, 1992.
- 57) Mottram, T.T., D.L.O. Smith and R.J. Godwin: Monitoring milk flow as an aid to management in automatic milking systems, *J. Agric. Engng. Res.*, 57, 263-267, 1994.
- 58) 野附 巖: オートストッパーミルクの開発, 搾乳作業の省力化に関する研究 (研究成果 114), 農林水産技術会議事務局, 東京, 137-182, 1979.
- 59) 野附 巖: 搾乳技術の発展経緯と搾乳ロボットへの期待, *農業機械学会誌*, 60 (6), 134-137, 1998.
- 60) Oostra, H. and K. Sallvik: Exit times for cows milked in an AMS: preliminary results, *Proc. of the International Robotic Milking Symposium*, Lelystad, The Netherlands, 65, 2000.
- 61) Ordolff, D.: A system for automatic teat-cup attachment, *J. Agric. Engng. Res.*, 30, 65-70, 1984.
- 62) Ordolff, D.: Safety considerations for automatic milking system, *J. Agric. Engng. Res.*, 38, 91-98, 1987.
- 63) Ordolff, D.: Investigations on the design of floats to control milk meters, *J. Agric. Engng. Res.*, 43, 113-123, 1989.
- 64) Parsons, D.J.: An initial economic assessment of fully automatic milking of dairy cows, *J. Agric. Engng. Res.*, 40, 199-214, 1988.
- 65) Phillips, C.J.C.: *Cattle behaviour*, Farming Press, UK, 77-111, 1993.
- 66) Rasmussen, M.D.: Influence of switch level of automatic cluster removers on milking performance and udder health, *J. Dairy Res.*, 60, 287-297, 1993.
- 67) Rodenburg, J. and B. Wheeler: Strategies for incorporating robotic milking into north American herd management, *Proc. of 1st North American Conference on Robotic Milking*, Toronto, Canada, III · 18-32, 2002.
- 68) 佐原伝三: 乳牛舎における作業姿勢と作業強度の分析, *農業機械学会誌*, 35 (3), 299-302, 1973.
- 69) 酒井 学, 阿見艶子: 心拍数とエネルギー代謝率との関係, *農業機械学会誌*, 29 (1), 39-41, 1967.
- 70) 酒井 学, 塩谷哲夫, 瀬川 敬, 金子七五三: 心拍数からみた牛舎作業の強度, *農作業研究*, 8, 1-3, 1969.
- 71) Schick, M., M.R. Volet and R. Kaufmann: Modelling of time requirements and milking capacity in automatic milking systems with one or two milking stalls, *Proc. of the International Robotic Milking Symposium*, Lelystad, The Netherlands, 32-37, 2000.
- 72) Schlunsen, D., H. Roth, H. Schon, W. Paul and H. Speckmann: Automatic health and oestrus control in dairy husbandry through computer aided system, *J. Agric. Engng. Res.*, 38, 263-279, 1987.
- 73) Schon, H., R. Artmann and H. Worstorff: The automation of milking as a key issue in future oriented dairy farming, *Proc. of International Symposium on Prospect for Automatic Milking*, EAAP Publ. No. 65, Wageningen, The Netherlands, 7-22, 1992.
- 74) 関 正裕, 小林 恭, 西田初生, 富樫辰志, 森泉昭治, 林 尚孝: 心拍数を用いた作業負担の評価法(1) — ステップテストによる較正法の検討 —, *農作業研究*, 31 (別号 1, 平成 8 年度日本農作業学会春季大会講演要旨), 47-48, 1996.
- 75) Sonck, B.R. and H.W.J. Donkers: The milking capacity of a milking robot, *J. Agric. Engng. Res.*, 62, 25-38, 1995.
- 76) 鈴木省三, 菊田 稔, 百瀬利正, 三浦祐輔: 乳牛の乳器の大きさとその変化について, *日本畜産学会報*, 30 (4), 260-263, 1959.
- 77) 高畑英彦, 笹島克己, 黒崎尚敏, 熊野康隆, 干場秀雄, 塚本 達, 工藤徹夫, 中島政雄: ミルキングシステム, デーリィ・ジャパン社, 東京, 21-40, 1991.
- 78) 垂井不二男, 鶴崎 孝: 片手下げ運搬における心拍数と呼気流速, *農作業研究*, 36, 44-50, 1979.
- 79) Thompson, P.D. and L.E. Campbell: Monitoring the flow of milk within machine milked teat by observing doppler shift of back-scattered ultrasound, *TRANSACTIONS of the A.S.A.E.*, 17, 496-499, 1974.
- 80) 時田正彦, 森田 茂, 小宮道士, 喜田環樹: わが国における自動搾乳システムの利用実態, *日本家畜管理学会誌*, 39 (2), 89-93, 2003.
- 81) 時田正彦, 森田 茂, 小宮道士, ツェンコヴァルミャナ, 畠山尚史, 堂腰 顕, 喜田環樹: 国際シンポジウム "Automatic Milking — a bet-

- ter understanding —” 報告, 日本家畜管理学会誌, 40 (4), 161-168, 2005.
- 82) 鶴崎 孝, 垂井不二男: 呼気圧測定に関する研究, 農作業研究, 34, 7-11, 1979.
- 83) Williams, D.M. and G.A. Mein: The bovine teat canal: Information from measurement of velocity of milk flow from the teat, J. Dairy Res., 53, 179-185, 1986.
- 84) Wood, P.D.P.: Factors affecting the shape of the lactation curve in cattle, Anim. Prod., 11, 307-316, 1969.

Summary

The automatic milking system was used to milk cows on some 2200 commercial farms in over 13 countries by the end of 2003 since the first system on commercial farm was implemented in The Netherlands in 1992. The present report arranges the factor that had an influence on the milking efficiency concerning the operation of the automatic milking system for completely liberating dairy workers from the milking labor that depends heavily on human labor, and provides a summary of studies aimed to establish the most suitable operation technique.

1. Measurements on the Labor Burden in Milking Works of the Conventional Milking System

This study attempted to evaluate labor burdens by examining working posture, heart rate and breathing count in milking routines of the pipeline system and the rotary milking parlor. Milking simulations by the pipeline milking system were conducted in a laboratory for 4 milking models to evaluate methods of reducing the labor burden involved in pipeline milking. The results obtained were as follows.

(1) The posture characteristic in the pipeline system was knees bent at an angle of 40-50° while the milking unit was being attached or removed. The backbone was bent at the waist at an angle of 40° when taking a cleaning towel from the cart. When attaching the unit to the milk-tap, an upper arm was raised at a horizontal angle of 90° or more. On the other hand, the angles of the knee and waist did not shift largely in the parlor system, but the frequencies that raised an upper arm at an angle of 50° or more were higher than in the pipeline system.

(2) Changes in energy consumption during the milking routine, as calculated by examining heart rate, were fewer in the parlor system than in the pipeline system. In the pipeline system, RMR and the increase in heart rate were higher with averages of 5.3 and 67.1%, respectively, compared to 3.7 and 29.0% in the parlor system. Because energy consumptions changed during the routine work and increased as it progressed, the labor burden in the pipeline system is evaluated to be heavier than that of the parlor system.

(3) The calibrated value of heart rates was used to correct personal differences and daily variations. The maximum calibrated value in the ACR model was less than those in the normal and cart models, in regard to the improvement of the labor burden. The average calibrated value in the parlor model was 34, the maximum value 66 and the labor burden was the lowest of all the milking models.

(4) In the ACR model of milking simulation, the time spent in a working posture, with knees bent at an angle of less than 90°, was approximately 6% less than 2 other models, excluding the parlor model, due to the use of automatic cluster removal. Bending at the waist at an angle of 40° or more decreased slightly in the cart model.

(5) In the cases of the normal and ACR models, heart rates were high immediately after movement of milking units, and significant differences ($P < 0.05$) were found in the labor burdens involved in movement of the units.

2. Udder Shape and Teat Location of Dairy Cows Examined for Suitability to Automatic Milking System

The study examined the udder shape and teat location of dairy cows to assess the suitability of the milking robot at a farm where the automatic milking system was newly introduced, and at three farms where the cows had become accustomed to the automatic milking system. Suitability was assessed largely by the rate

of successful milking.

(1) In cows on the three farms already using the automatic milking system, the distance between the front teat and rear teat increased significantly ($P < 0.01$) with age (parity). The distance from the lowest point of the udder to the floor decreased significantly ($P < 0.01$) with parity.

(2) On the farm where the automatic milking system was newly introduced, the milking robot for the recommended condition of suitability was found to be unsuitable for 51% of the cows in the first parity, 38% in the second parity, and 69% in third or later parities. The ratio of unsuitable cows was considerably lower in the actual condition of three farms.

(3) In cows that had been examined for suitability before introduction to the automatic milking system and had been deemed highly suitable, the rate of successful milking by the robot was greater than 90%. Among the cows that had indicated a low suitability, 3 cows had a 90% rate of successful milking after introduction to automated milking. However, the rate of successful milking was low for all the other cows that had received a low suitability score.

These results show that the criteria for judging the suitability of lactating cows for the automatic milking system are reliable.

3. Influence of Variance with Passage of Time in Teat Location of Dairy Cows and Stay in Milking Stall on Operation of Automatic Milking System

This research analyzed the influence of variance with passage of time in teat location and distance between teats about the parity and stage of lactation on operation of the automatic milking system. Admission times to the milking stall and leaving times from the milking stall were measured, and effect of the experimental leaving device with the sound stimulation for the system utilization was verified.

(1) The amount of change in a lactation period of distances of teats to cause attachment failure of the milking machine was not large in the first parity, but it increased gradually when parity increased. In each distance between teats, the amount of change in the distance between front teats was most large, and a cow that decreased more than 20mm in 100 days was recognized.

(2) The approach time to the milking stall was different by feeding hour and frequency, milking and passage. However, the milk yield and the amount of concentrated feed in the stall did not affect the admission time or leaving time for each cow.

(3) The leaving device with the sound stimulation shortened leaving time by the fourth day after the start of the operation, an effect of improvement in utilization of the automatic milking system was recognized.

4. Mathematical Analysis of Milking Capacity in Automatic Milking System

This study reported the mathematical model in calculating the milking efficiency of the automatic milking system (with a theoretical number of milking cows) so that it can be used more effectively. The milking operation time was measured throughout a 24-hour period in three types of automatic milking systems on 5 farms before the mathematical model of milking capacity was made. The cleaning interval to influence operation time was changed, and the actual operation time was measured. As a result, the following conclusions were obtained.

(1) Even if the milk secretion characteristic of the herd was changed, we were able to calculate the milking capacity with the mathematical model.

(2) Regarding the theoretical number of milking cows, an increase of 23-28% was recognized when the average milk flow of the herd increased from 2kg/min to 3kg/min, a decrease of 29-30% was recognized when the average daily milk yield increased from 24kg to 34kg, and an increase of 21-32% was recognized when the milk yield per milking increased from 8kg to 14kg.

(3) The changes in the actual operation time by the change of the cleaning interval were 1.3-1.5%, and the change in the theoretical number of milking cows was only 3%.

5. Optimization of Usage for Automatic Milking System

This research executed a verification examination of the mathematical model of the feeding speed of a feeding system in an automatic milking stall. Moreover, using a mathematical model of milking efficiency, log data was compared among 31 farms that installed the automatic milking system, and an improvement method for efficacious operation was analyzed using these results. The following conclusions were obtained.

(1) There was an error with the mathematical model of feeding speed caused by the remaining feed amounts being transferred to the next day because the cows were milked at an unfixed period in the automatic milking system. To prepare 0.25kg/min on average (0.43kg/min on maximum) faster feeding speed than the theoretical feeding speed of the system is necessary in order to reduce the remaining feed amounts. Milking two times per day or more it is necessary to use the feeding system correctly because the feed amount per milking increases.

(2) The greatest factor that changed the theoretical number of milking cows in an automatic milking system was the average daily milk yield. In 4 farms where the system utilization was more than 90%, when the milk yield per milking was increased by 2kg, the system utilization decreased to 85%. When there are many cows or when the system utilization is high, it is considered that the overcrowded system is improved by slightly increasing the set point of milk yield per milking without changing the number of milking cows.