HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	近赤外分光法による搾乳時乳質の連続測定（第2報） : 搾乳時の乳質の測定精度
Author(s)	川崎, 正隆; 川村, 周三; 中辻, 浩喜 他
Citation	農業機械学会誌, 71(3), 63-69 https://doi.org/10.11357/jsam.71.3_63
Issue Date	2009
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/71031
Rights	© 2009 農業機械学会
Type	journal article
File Information	71_3_63.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

研究論文

農業機械学会誌 71(3)：63〜69，2009

近赤外分光法による搾乳時乳質の連続測定（第2報）

――搾乳時の乳質の測定精度――

川崎正隆*1・川村周三*2†・中辻浩喜*3・夏賀元康*4

要　旨

第1報にて，試作した乳質測定装置を用いて静置した状態で生乳の乳成分を高い精度で測定できることがわかった。本報では実際の搾乳時に本装置を用いて，乳質（乳成分：乳脂肪，乳タンパク質，乳糖）の測定を行った。その結果，乳脂肪の測定精度は決定係数 r^2＝0.94，標準誤差 SEP＝0.55%，乳タンパク質の測定精度は r^2＝0.80，SEP＝0.13%，乳糖の測定精度は r^2＝0.83，SEP＝0.09% と，いずれも良好であった。さらに，試作した装置により搾乳時の乳成分をリアルタイムに測定することができた。また，乳質測定装置で測定した乳成分と搾乳時の乳量から搾乳1回分の乳成分を算出したところ，実測値と良く一致した。

［キーワード］乳脂肪，乳タンパク質，乳糖，オンラインリアルタイム測定，搾乳1回分乳成分

Near-Infrared Spectroscopy for Online Real-Time Monitoring of Milk Quality during Milking (Part 2)

――Precision and Accuracy of Calibration Models to Assess Milk Quality during Milking――

Masataka KAWASAKI*1, Shuso KAWAMURA*2†, Hiroki NAKATSUJI*3, Motoyasu NATSUGA*4

Abstract

We previously showed in part 1 that a near-infrared spectroscopic sensing system constructed on an experimental basis can be used to assess milk quality in the laboratory. In this study, we developed calibration models for predicting three major milk constituents (fat, protein and lactose) during milking by the sensing system and validated the precision and accuracy of the models. Coefficient of determination (r^2) and standard error of prediction (SEP) of the validation set for fat were 0.94 and 0.55%, respectively. The values of r^2 and SEP for protein were 0.80 and 0.13%, respectively, and the values of r^2 and SEP for lactose were 0.83 and 0.09%, respectively. These results indicate that the sensing system can be used to assess milk quality in real-time during milking. From the data of milk constituents measured by the sensing system and milk flow rate during milking, we calculated milk constituents of whole one milking. The calculated values of milk constituents well agreed with the reference values.

[Keywords] fat, protein, lactose, online real-time monitoring, milk constituents of whole one milking

＊1 会員，北海道大学大学院農学研究院（〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目　TEL：011-706-2558）
Graduate School of Agricultural Science, Hokkaido University, Kita 9, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8589, Japan
＊2 会員，北海道大学大学院農学研究院
＊3 北海道大学大学院農学研究院
＊4 会員，山形大学農学部（〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町1-23　TEL：0235-28-2906）
Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23, Wakaba-machi, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan
† Corresponding author : shuso@bpe.agr.hokudai.ac.jp

I 緒　言

近年，北海道の酪農は大規模化の傾向にある。そのために乳牛を群管理する技術（Kondo, 1998）が普及しつつある。一方で乳牛の健康管理や乳質の向上には乳牛の個別管理が必要である。個別管理のためには搾乳時に乳質をリアルタイムで測定する技術が必要である。

そこで本研究では，近赤外分光法を用いた乳質のリアルタイム測定技術の確立を目標としている。第1報（Kawasaki et al., 2009）にて近赤外分光法を用いた乳質測定装置を試作し，その精度を静置状態の生乳で検証した。その結果，生乳の乳成分（乳脂肪，乳タンパク質，乳糖）を高い精度で測定できる事を確認した。本報では，第1報の乳質測定装置を用いて実際に搾乳時の乳成分の連続測定を行い，その測定精度を検証した。さらに搾乳時の乳成分の変動のモニタリングを行い，また搾乳1回分の乳成分の算出を行いその精度を検証した。

II 実験方法

1. 供試乳牛および試料

供試乳牛に北海道大学研究農場で飼養されているホルスタイン種の乳牛2個体（Cow1059，Cow1066）を用いた。同農場の搾乳は1日に朝夕の2回行われる。朝の搾乳開始時刻は8時30分，夕方の搾乳開始時刻は16時である。搾乳方式はパイプラインミルカー方式である。実験は1999年9月28日から12月22日までの間，約2週間ごとに2回（夕方の搾乳時および翌日の朝の搾乳時）行った。測定期間中にのべ28回の搾乳を行い，合計で762点のデータを採取した。採取した2頭分のデータはあわせて一つのデータセットとして扱った。全試料の乳成分は，乳脂肪の範囲が0.65〜11.36%，平均が4.78%，標準偏差が2.23%（以下同順）であり，乳タンパク質が2.60〜3.96%，3.10%，0.29%であり，乳糖が4.50〜5.49%，4.99%，0.22%であり，それらの分布はほぼ正規分布であった。

2. 測定方法

(1) 乳質測定装置による測定

試作した乳質測定装置による測定フローチャートを図1に示した。乳質測定装置全体の測定の様子を図2に，搾乳時のスペクトル測定部の様子を図3に示した。スペクトル測定部は第1報で用いたものと同一である。

搾乳した生乳はミルカーからスペクトル測定部へ送られる。測定部では600〜1050 nmの波長域で1 nm毎の拡散透過率を測定した。スペクトルの測定（記録）は15秒間隔で行った。その後，生乳は乳量計に送られる。乳量計では1分毎の乳量を計測した。その後，生乳はサンプラーに送られる。サンプラーでは1分間隔で集積した基準分析用試料を採取した。最後に生乳はバケットで回収される。搾乳終了後に搾乳1回分の乳量の測定および搾乳1回分の基準分析試料の採取を行った。

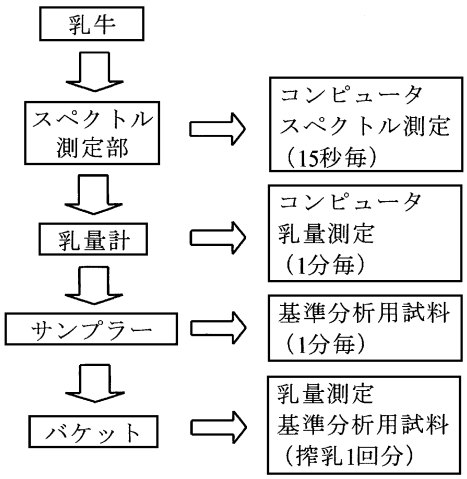

図1　測定のフローチャート
Fig. 1　Flow chart of the experiment

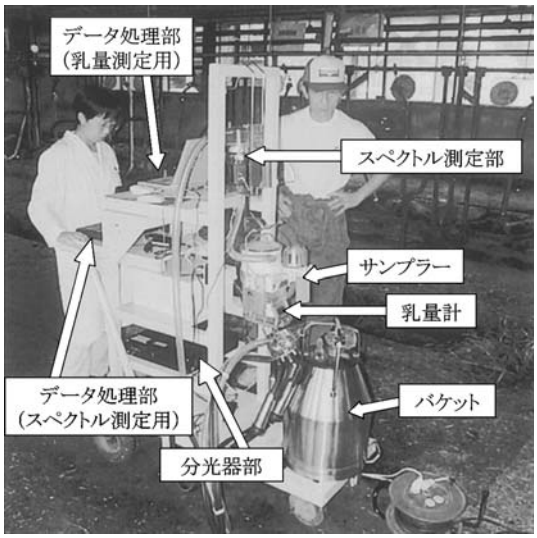

図2　乳質測定装置全体の様子
Fig. 2　Online near-infrared spectroscopic sensing system

(2) 乳質の基準分析

測定する乳質は乳脂肪，乳タンパク質，乳糖である。乳質の基準分析はMilkoscan-S54A（Foss Electric社製）を用いて行った。

3. 検量線の作成と精度の検証

第1報では生乳を静置した状態での検量線を作成した。本報では搾乳時の生乳を測定するため，生乳は気泡を含み脈動している。そこで静置状態での検量線では精度の良い測定は困難と予想し，改めて搾乳時の乳質を測定するための検量線を作成することとした。

本研究では，搾乳時の乳質をリアルタイムで連続測定することを最終目標としている。そのためにはスペクトルの前処理（平滑化，微分，正規化など）は簡略化することが望ましいと考えた。したがって本実験ではスペク

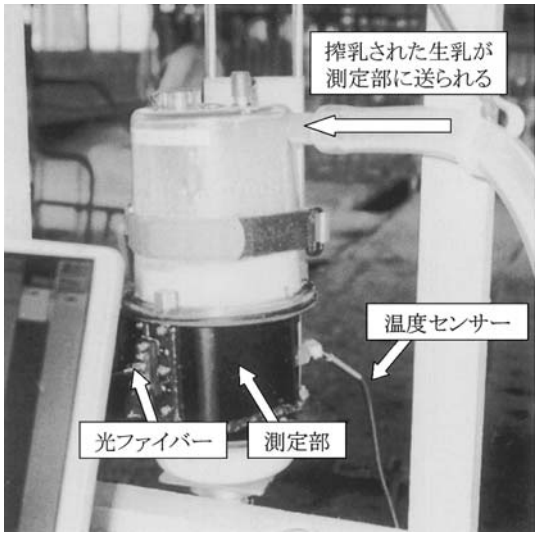

図 3　搾乳時のスペクトル測定部
Fig. 3　The near-infrared spectrum sensor during milking

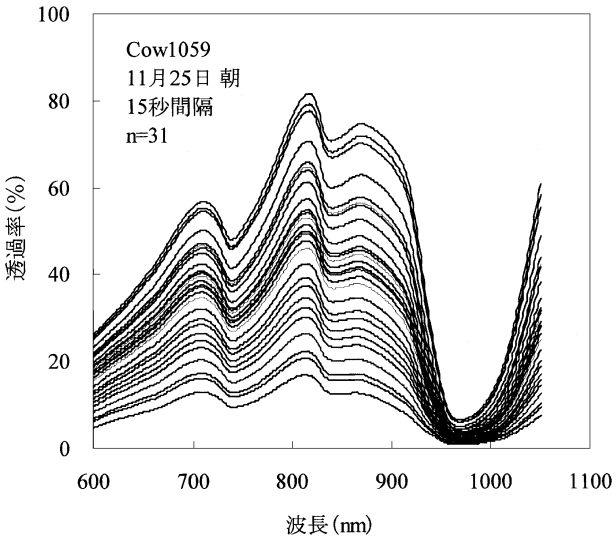

図 4　搾乳時の生乳の近赤外拡散透過スペクトル
Fig. 4　Original near-infrared spectra of raw milk during one milking

トルの前処理は行わず，原スペクトル（生乳の拡散透過スペクトル）を用いて以下の検量線の作成と測定精度の検証を行った。

測定した原スペクトルと乳質の基準分析値から乳質測定用検量線を作成した。検量線の作成と精度の検証には多変量解析ソフト The Unscrambler v6.11（CAMO 社製）を用い，Partial least squares（PLS）回帰分析により行った。全試料数（762 点）の 2/3（508 点）を用いて検量線を作成し，残りの 1/3（254 点）で検量線の測定精度の検証を行う予測検定法を用いた。検量線作成試料と精度検証試料の分割はランダムに行った。その際，検量線作成試料の成分範囲に検証用試料の成分値が含まれるようにした。

また，近赤外分光法により測定した搾乳 1 分毎の乳成分と乳量計で測定した 1 分毎の乳量を加重平均し，搾乳 1 回分の乳成分を算出した。算出した搾乳 1 回分の成分値と搾乳終了後にバケットから採取した試料の基準分析値とを比較し，搾乳 1 回分の乳成分の推定精度を検討した。

III　結果と考察

1. 搾乳時の拡散透過スペクトル

搾乳時に測定した生乳の原スペクトルの一例を図 4 に示した。この図は，Cow1059 を 11 月 25 日の朝に搾乳した際に，搾乳開始から終了までの間，15 秒間隔で測定したスペクトルである。測定波長範囲（600〜1050 nm）におけるスペクトル全体の変動は，第 1 報（Kawasaki et al., 2009）の静置状態のスペクトルと同様であった。

この搾乳時において 1 分毎に集積して採取した生乳試料の成分の基準分析値は，乳脂肪は範囲が 1.39〜6.76% で平均が 3.53%，乳タンパク質は範囲が 2.95〜3.06% で平均が 3.03%，乳糖は範囲が 4.84〜5.34% で平均が 5.08% であった。このような乳成分の変動により，図 4 に示したようにスペクトルの透過率が上下に変動しているものと考えられる。

2. 搾乳時の乳成分の測定精度

搾乳時の乳成分の測定精度を表 1 および図 5〜7 に示した。図表中の SD は標準偏差（Standard deviation），NF は検量線作成時の PLS 回帰分析のファクター数（Number of factors），r^2 は決定係数（Coefficient of determination），SEP は近赤外分光法による予測値の標準誤差（Standard error of prediction），Bias は基準分析値の平均と近赤外分光法による予測値の平均との差，RPD は検証用試料の標準偏差（SD）に対する予測値の標準誤差（SEP）の比（Ratio of SEP to SD, SD/SEP）である。

検量線作成時の PLS 回帰分析のファクター数は乳脂肪が 7，乳タンパク質が 8，乳糖が 6 であった。

乳脂肪の測定精度は r^2 が 0.94 と高く，第 1 報（Kawasaki et al., 2009）における静置状態の r^2（0.95）と同等であった。ところが SEP は 0.55% と第 1 報の SEP（0.30%，0.31%）と比べてやや大きく，RPD は 3.77 と第 1 報（RPD＝4.47，4.76）に比較して小さかった。一方，Bias は−0.01% と小さく，回帰式はほぼ y＝x であった。搾乳時の乳脂肪の測定精度は，静置状態に比較してやや劣ったが，良い精度であると判断した。

乳タンパク質と乳糖の測定精度は r^2 がそれぞれ 0.80，0.83 であり，SEP が 0.13%，0.09%，RPD が 2.25，2.40 であった。静置状態における測定と比較すると，乳タンパク質ではわずかに精度が良く，乳糖ではわずかに精度が劣った。

搾乳時の生乳は気泡を含んで脈動し，しかも乳量はお

表1　搾乳時の乳成分の測定精度

Table 1　Validation statistics of the near-infrared instrument for determination of three major milk constituents during milking

乳成分	全試料				NF	測定精度検証					
	n	成分範囲（%）	平均（%）	SD（%）		n	r^2	SEP（%）	Bias（%）	RPD	回帰式
Fat	762	0.65–11.36	4.78	2.23	7	254	0.94	0.55	−0.01	3.77	y＝1.00x＋0.02
Protein	762	2.60– 3.96	3.10	0.29	8	254	0.80	0.13	0.02	2.25	y＝0.94x＋0.18
Lactose	762	4.50– 5.49	4.99	0.22	6	254	0.83	0.09	0.00	2.40	y＝0.98x＋0.11

n：試料数，SD：標準偏差（Standard deviation），NF：検量線作成時のPLS回帰分析のファクター数（Number of factors）
r^2：決定係数（Coefficient of determination），SEP：近赤外分光法による予測値の標準誤差（Standard error of prediction）
Bias：基準分析値の平均と近赤外分光法による予測値の平均との差
RPD：検証用試料の標準偏差（SD）に対する予測値の標準誤差（SEP）の比（Ratio of SEP to SD, SD/SEP）

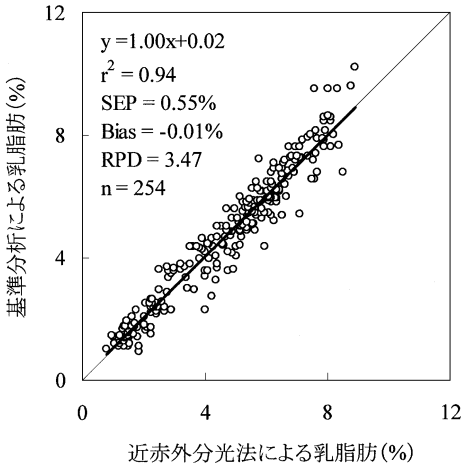

図5　搾乳時の乳脂肪の測定精度

Fig. 5　Correlation between reference fat and NIR-predicted fat during milking

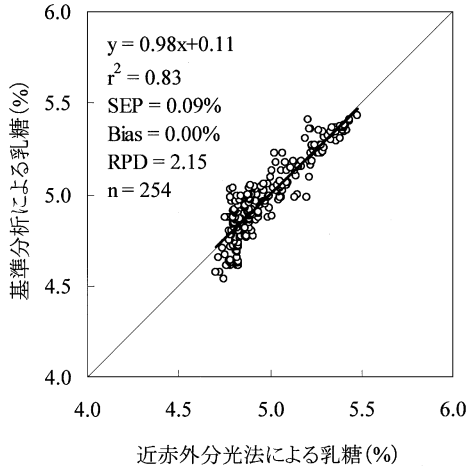

図7　搾乳時の乳糖の測定精度

Fig. 7　Correlation between reference lactose and NIR-predicted lactose during milking

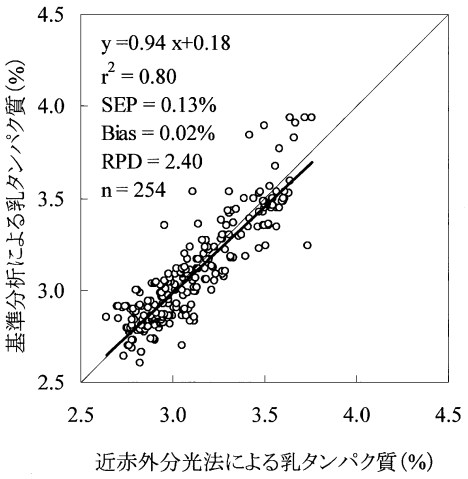

図6　搾乳時の乳タンパク質の測定精度

Fig. 6　Correlation between reference protein and NIR-predicted protein during milking

よそ0.3〜4 kg/minの範囲で短時間に変化する。試作した乳質測定装置は測定部に生乳を一旦滞留させ，オーバーフローパイプを用いて測定部の生乳量を一定に保つ構造とした（Itoh, 2001）。そのため，大きな気泡は生乳液面上部に浮き，同時に乳量が変動してもハロゲンランプと光ファイバーの光軸と生乳液面との距離を一定に保つことができる。このような構造により，試作した乳質測定装置を用いて，搾乳時における乳成分を静置状態とほぼ同等な精度で測定することが可能となった。

Schmilovitchら（Schmilovitch et al., 2007）は近赤外分光法を用いた乳成分測定装置を作成し，ミルキングパーラのミルカーに組込んだ際の測定精度を乳脂肪のr^2が0.83，SEPが0.3%，乳タンパク質のr^2が0.83，SEPが0.1%と報告している。この装置の構造や測定波長は明らかにされていないが，その測定精度は本研究と同程度であった。

3. 搾乳時の乳成分の変動

従来では搾乳時の乳成分の短時間の変動を測定することは困難であった。ところが本研究の乳質測定装置によりオンラインで連続的に乳成分を測定することが可能となった。実験期間中の28回の搾乳時の乳成分の変動は全体として，乳脂肪は搾乳開始時に低く搾乳終了に向けて5〜8%程度増加する，乳タンパク質は搾乳時の変動

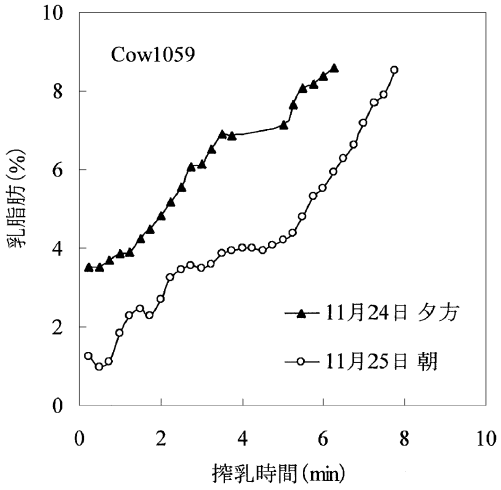

図 8　搾乳時の乳脂肪の変化
Fig. 8　Changes in fat during milking

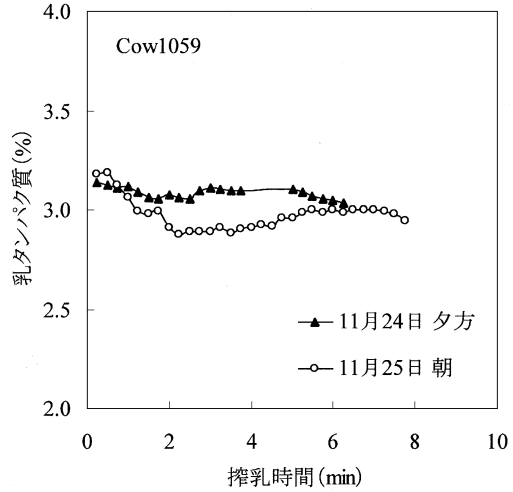

図 9　搾乳時の乳タンパク質の変化
Fig. 9　Changes in protein during milking

はほとんど認められないもしくはわずかに（0.1〜0.3% 程度）減少する，乳糖は搾乳開始から終了に向けて 0.3〜0.6% 程度減少する，という傾向が認められた。図 8〜10 に乳質測定装置によって測定された搾乳時の 15 秒毎の乳成分の変化の代表例を示した。これらの図は Cow 1059 を 11 月 24 日の夕方および翌 11 月 25 日の朝に搾乳した際の乳成分の変化である。11 月 25 日朝の乳成分のデータは図 4 のスペクトルから算出したものである。

図 8 によれば，乳脂肪は搾乳開始時に低く，搾乳時間の経過とともに増加していく傾向が見られた。この理由は搾乳のメカニズムおよび搾乳時の乳牛の生理に起因する。乳房内で乳は乳腺槽および乳頭槽に溜まっている。乳頭槽内の乳はカテーテルの挿入等により物理的に容易に排出できるが，乳腺槽内の乳はオキシトシンによる乳汁排出反射が起こらないと排出できない（Furumura, 2006）。すなわち，搾乳作業では初めに前搾りや乳頭の洗浄などで乳頭や乳房に外部から物理的刺激を与える。この刺激が脊髄を通って大脳の視床下部へ伝達されると，下垂体後葉からオキシトシンが分泌され，血中に流入する。そのオキシトシンが乳腺に到達すると，乳腺槽内の乳が排出される。乳頭が刺激を受けてから乳汁排出反射が起こるまでに 30〜60 秒の時間がかかる。血中のオキシトシン濃度上昇は 4〜5 分間持続する。乳中の脂肪球は乳腺胞腔内で上部に浮上して凝集しやすいため，搾乳初期には乳脂肪の低い乳が排出され，そして搾乳時間の経過に伴って乳脂肪の濃度が高くなる（Furumura, 2006）。さらに乳脂肪は粘性があるため乳頭への移動スピードが遅い。そのため搾乳が終了に近づき乳房内の圧力が低下してきてから，乳脂肪は乳頭付近に移行する。この事も搾乳の後半に乳脂肪が高くなる原因とされている（Ontsouka et al., 2003）。

また朝より夕方の搾乳時の乳の方が乳脂肪が高かった。北海道大学研究農場における搾乳間隔が朝から夕方

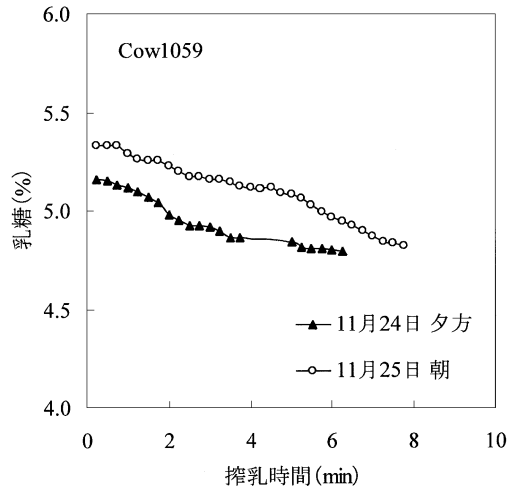

図 10　搾乳時の乳糖の変化
Fig. 10　Changes in lactose during milking

の搾乳までが 7.5 時間と短いため，朝搾乳時より夕方搾乳時の方が乳量が少ない。夕方の搾乳 1 回分の乳量は平均で 10.0 kg，最多で 15.4 kg，最少で 5.6 kg であり，朝の搾乳 1 回分の乳量は平均で 18.5 kg，最多で 22.8 kg，最少で 14.2 kg であった。その結果，夕方に搾乳した乳の方が，乳脂肪を多く含む残乳（朝搾乳時に乳房内に残った乳）の影響が大きくなる（Furumura, 2006）ため，乳脂肪が高くなると考えられる。

乳タンパク質は搾乳開始から終了までわずかに低下する傾向があったが，大きな変動は認められなかった。

乳糖は搾乳時間の経過とともに減少した。しかしその変動は乳脂肪の変動と比べると小さかった。

Tsenkova ら（Tsenkova et al., 2000）は 3 頭の乳牛から搾乳時の生乳を 3L 毎に採取し，それを研究室に持ち帰り，近赤外分析計（NIRSystems model 6500）で静置状態で測定し，乳成分測定の検量線の作成と精度の検証を

表 2　搾乳 1 回分の乳成分の測定精度
Table 2　Validation statistics of the near-infrared instrument for determination of three major milk constituents at each milking

乳成分	成分範囲（%）	n	r^2	SEP（%）	Bias（%）	回帰式
Fat	2.49-7.11	28	0.96	0.28	0.26	y＝1.03x＋0.11
Protein	2.75-3.89	28	0.86	0.12	0.00	y＝1.07x－0.23
Lactose	4.69-5.25	28	0.85	0.07	－0.05	y＝1.00x－0.03

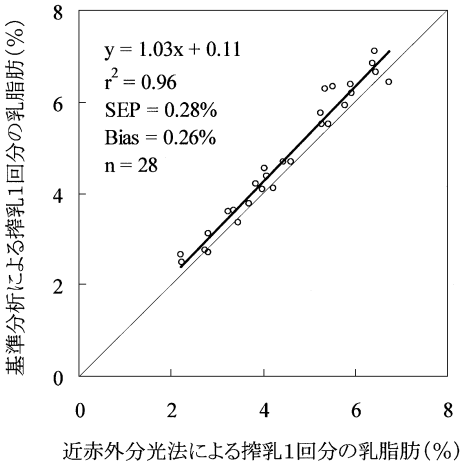

図 11　搾乳 1 回分の乳脂肪の測定精度
Fig. 11　Correlation between reference fat and NIR-predicted fat at each milking

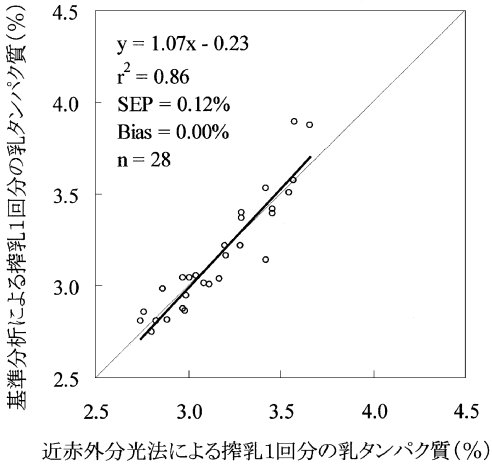

図 12　搾乳 1 回分の乳タンパク質の測定精度
Fig. 12　Correlation between reference protein and NIR-predicted protein at each milking

行っている。Tsenkova らの測定精度は，乳脂肪では本研究より優るが，乳タンパク質と乳糖では本研究と同様な精度であった。また，Tsenkova らは，搾乳時の 3L ごとの生乳の成分変動は，本研究と同様に，乳脂肪が搾乳開始から終了まで大きく増加し，乳タンパク質と乳糖の大きな変化はなかったと報告している。

本研究では搾乳時に 15 秒毎にスペクトルを記録したため，15 秒毎の乳成分の変化を示した。この乳質測定装置ではスペクトルの測定（取得）は短時間（約 0.4 秒毎）に常時行っているため，さらに短い時間間隔での乳成分の変化の測定も可能である。

以上のように，試作した乳質測定装置を用いて，搾乳時の乳質の変動をオンラインでモニタリングできることがわかった。

4. 搾乳 1 回分の乳成分の測定精度

既述したように，試作した乳質測定装置で搾乳時の乳成分を 15 秒間隔でモニタリングできた。ところが，搾乳時の乳量（生乳の流量）は一般的に搾乳開始時に多く，搾乳終了に向けて少なくなる。本研究の実測値では，乳量はおよそ 4〜0.3 kg/min の範囲で大きく変化した。したがって，一定時間間隔の乳成分測定値だけでは搾乳 1 回分の生乳全体の乳成分を知ることはできない。

そこで，近赤外分光法により測定された 1 分毎の乳成分（15 秒毎の乳成分値 4 つの平均値）と乳量計で測定した 1 分毎の乳量とを加重平均し，搾乳 1 回分の乳成分を算出し，その値と基準分析値とを比較した。

結果を表 2 および図 11〜13 に示した。いずれの乳成分においても r^2 が高く，SEP は測定範囲に対して小さかった。一方で乳脂肪と乳糖では Bias が生じた。これは，搾乳終了間際の 1 分前後において生乳流量が 0.5 kg/min 以下となる場合があり，この時，測定部の生乳の液面がオーバーフローパイプ上面より低くなり，スペクトルの測定ができなくなるためである。すなわち，乳脂肪の算出値が基準分析値と比較して低くなったのは，搾乳終了間際の乳量の低下により乳脂肪の高い試料の測定ができなかったためである。同様に乳糖の算出値が基準分析値と比較して高くなったのは，搾乳終了間際の乳糖の低い試料の測定ができなかったためである。また乳タンパク質で Bias が生じなかったのは，搾乳時の乳タンパク質の変動がわずかであるためと考えられる。しかし，いずれも実用に際して十分な測定精度を得られたと考えられる。

以上のことから，試作した乳質測定装置を用いて，搾乳 1 回分の乳成分を良い精度で算出することができた。

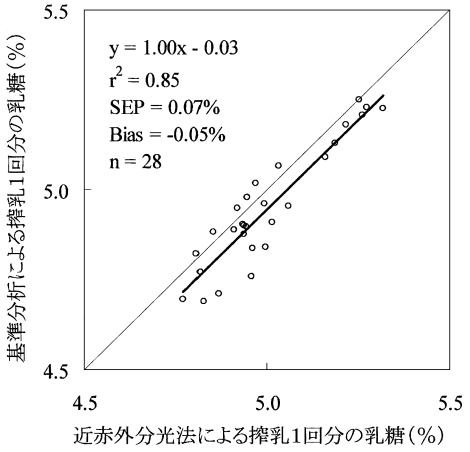

図 13　搾乳 1 回分の乳糖の測定精度
Fig. 13　Correlation between reference lactose and NIR-predicted lactose at each milking

V 摘　　要

試作した乳質測定装置を用いて，搾乳時における乳成分を高い精度で測定でき，乳成分の変動をオンラインでモニタリングすることができた。さらに乳質測定装置を用いて，搾乳 1 回分の乳成分を良い精度で算出することができた。

References

Furumura, K., 2006. Fundamentals and application for dairy cow management (in Japanese). Kashiwamura, F. Ed., (Revised edition in 2006). Daily Japan Co., Tokyo, 128–144.

Itoh, K., 2001, An instrument for continuous determination of milk constituent contents. Japan Patent Office, Patent No. P2001–91458A.

Kawasaki, M., Kawamura, S., Nakatsuji, H., Natsuga, M., 2009. Near-infrared spectroscopy for online real-time monitoring of milk quality during milking (Part 1). Journal of JSAM, 71 (2), 39–45.

Kondo, S., 1998. Behavior and herd management of dairy cattle (in Japanese). Dairyman, Sapporo, 1–90.

Natsuga, M., Kawamura, S., Ito, K., 2002. Effects of wavelength range and light path-length on the accuracy of the constituent analysis of unhomogenized milk using near-infrared spectroscopy. Journal of JSAM, 64 (5), 83–88.

Ontsouka, C.E., Bruckmaier, R.M., Blum, J.W., 2003. Fractionized milk composition during removal of colostrum and mature milk, J. Dairy Sci., 86, 2005–2011.

Schmilovitch, Z., Katz, G., Pinski, N., Hoffman, A., Egozi, H., Maltz, E., 2007. Real time milk analyzer. Proceedings of the 3rd CIGR Section VI International Symposium, Naples, Italy, 1–6.

Tsenkova, R., Atanassova, S., Itoh, K., Ozaki, Y., Toyoda, K., 2000. Near infrared spectroscopy for biomonitoring : cow milk composition measurement in a spectral region from 1,100 to 2,400 nanometers. J. Anim. Sci., 78, 515–222.

（原稿受理：2008 年 1 月 24 日・質問期限：2009 年 7 月 31 日）

コ　メ　ン　ト

［閲読者のコメント］

実用上，高い測定精度を保つには気泡の対策が必要であると考えますが，測定の際になんらかの対策を行っているのでしょうか？

［コメントに対する著者の見解］

論文中でも述べていますが，試作した乳質測定装置は測定部に生乳を一旦滞留させ，オーバーフローパイプを用いて測定部の生乳量を一定に保つ構造としています。その結果，大きな気泡は生乳液面上部に浮き，同時に乳量が変動してもハロゲンランプと光ファイバーの光軸と生乳液面との距離を一定に保つことができました。このような構造により，大きな気泡の影響は除去できたと思います。ただし，測定中の生乳の中の様子は観察できませんが，生乳は測定部内で常に流動しており，小さな気泡の影響は受けていると思われます。しかし小さな気泡の影響は小さいと思われます。その結果として，試作した乳質測定装置を用いて，搾乳時における乳成分を静置状態とほぼ同等な精度で測定することが可能となったと思われます。