

近赤外分光法による搾乳時乳質のリアルタイム測定技術

学位論文内容の要旨

近年、北海道では酪農家の戸数の減少とともに酪農家1戸あたりの飼養頭数が増加し、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が普及しつつある。一方で乳質や産乳性の向上、乳牛の栄養管理や病気の予察には、個体管理が重要である。本研究は大型酪農における個体管理を実現するため、搾乳時における乳質のリアルタイム測定技術の確立を目的とした。本研究では近赤外分光法を用いた乳質測定装置を試作し、実用化を想定した検量線の作成とその測定精度の検証を行った。以下にその内容を記す。

1. 試作した乳質測定装置

試作した乳質測定装置はスペクトル測定部、分光器部、データ処理部、乳量計、試料採取部から構成される。スペクトル測定部は生乳に光を照射するハロゲンランプ、生乳を透過した光を分光器部に送る光ファイバー、冷却ファンから構成される。測定室の生乳体積は約 230 mL である。ハロゲンランプと光ファイバーの光軸は同一水平面上で直交するように取り付け、SN (Signal per noise) 比の向上を図った。測定室内は洗浄性を考慮し構造を円柱型にし、内壁の材質にガラスを用いた。光源の光は測定室内で生乳を拡散透過し、光ファイバーに入る。測定室内では生乳をオーバーフローさせ、光軸から生乳液面までの距離が一定 (93 mm) になるようにした。分光器は回折格子型である。測定波長範囲は実用化した場合のセンサー部のコストを考慮し、短波長域 (600~1050 nm) を用いた。波長分解能は 5 nm である。ヒーターユニットは分光器内部の温度を一定 (28℃) に保ち、周囲の温度変動によるスペクトルの変動を防ぐ。測定室内が乾燥した状態の光の信号強度を Reference とし、1 nm 毎の透過率を算出し、これを生乳スペクトルとした。

2. 試作した乳質測定装置の測定精度

試作した装置の性能を検証するため、搾乳時に流動する生乳のスペクトルを測定し、乳質測定用検量線の作成および精度検証を行った。その結果、乳牛1個体および複数個体の生乳の乳脂肪、乳糖、乳タンパク質、体細胞数 (Somatic cell count: SCC)、乳中尿素態窒素 (Milk urea nitrogen: MUN) を精度よく測定する事ができた。またその際、検量線作成のためのスペクトルの前処理は不要である事、検量線作成方法として Partial least squares (PLS) 回帰分析が適切であることが分かった。よって試作した装置による乳質測定の可能性が示唆された。

3. 検量線の測定精度に影響を与える要因の検討

本装置の実際の運用を想定すると、検量線作成試料 (Calibration set) に含まれない乳牛個体や泌乳期間の試料を測定する事が考えられる。そこで安定して高い精度を得られるロバストな検量線を作成するために、検量線の測定精度に影響を与える要因について検討を行った。その結果、Calibration set と精度検証試料 (Validation set) で個体や期間が同じ試料が含まれる場合、実用上十分な精度

が得られた。一方で個体や期間が異なる場合、乳脂肪は高い精度で測定できたが、他の乳質の測定精度は低下した。

また近赤外分光法による計測システムの実用では精度を維持するために、従来用いていた Calibration set に新たな試料を加え検量線を作成する、検量線の改良更新が行われる。そこで本装置において検量線の改良更新を行った場合の精度検証を行った。その結果、乳脂肪は高い精度で測定できたが、他の乳質の測定精度は低下した。また精度低下を起こした乳質の検量線は PLS factor 数 (nF) が過剰であり、Over-fitting が生じていた。そこで nF の最適値を検討した。その結果、乳糖の測定精度は nF を調整する事により、決定係数 (r^2) の向上が認められた。しかし他の乳質では十分な精度を得る事はできなかった。

4. 検量線による乳質の測定原理

ロバストな検量線作成のため、乳質の測定原理を調べた。ここではスペクトルと乳質の関係性を表す PLS factor に着目し、検量線の解析を行った。

その結果、検量線の PLS factor 1 (Pf1) はいずれの乳質、個体においても乳脂肪の情報を持つ事がわかった。また乳糖と SCC は乳脂肪と高い内部相関を持つため Pf1 から情報を得られたが、乳タンパク質や MUN は乳脂肪との内部相関が低いため、十分な情報が得られていなかった。

また PLS factor 2 (Pf2) は N-H string を有する乳質の情報を持つ事がわかった。しかし、Pf2 はその情報量が少なく、ノイズなど他の要因の影響に弱く、実用レベルの検量線では不十分と考えられた。さらに PLS factor 3 は同じ乳質の検量線でも個体によって異なるものであった。Calibration set によって異なる PLS factor が検量線に含まれるため、Calibration set と Validation set で個体等の差異が生じた時に精度低下が起こると考えられた。よってスペクトルに含まれる乳質の挙動を捉えているのは Pf1 および Pf2 であった。しかし Pf2 の持つ情報量は少なく、実用レベルの検量線では Pf1 のみが有効と考えられた。

また内部相関が測定精度に関係している事が考えられたため、各乳質間の内部相関を調べた。その結果、内部相関は搾乳 1 回分のデータセットでは高かった。この内部相関は乳質が搾乳の経過によって一定の変動をするために泌乳生理上、必然的に生じる相関と考えられた。また搾乳複数回のデータセットでは乳脂肪と乳糖、乳脂肪と SCC、乳糖と SCC との間では内部相関が高いままであったが、他の乳質の組み合わせでは低下した。これは泌乳期の進行に伴い、乳質値が変動し、内部相関が変動、低下するためである。そのため Calibration set と Validation set それぞれに同じ個体や期間の試料が含まれる場合は、乳脂肪との内部相関の情報を利用して良い精度で測定する事ができるが、個体や期間が異なると内部相関の情報が共有されないため、精度は低下すると考えられる。従って各乳質間の内部相関の変動や低下もまた、個体や測定期間の変動に伴う測定精度低下の一因と考えられる。

5. 総括

試作した近赤外測定装置により搾乳中に乳脂肪を高い精度で測定できる事がわかった。また、乳糖は nF を調整する事により、ある程度の精度が得られた。乳タンパク質、SCC、MUN は実用を想定した検証では良い精度を得られなかった。これらの乳質を高い精度で測定するためには、測定波長域の再検討が考えられる。しかし波長域を拡大しても乳脂肪以外の乳質の情報を十分に持つスペクトルを測定できない事から、本論文で示された結果が近赤外分光法による生乳乳質のリアルタイム測定を行った際の測定精度の限界と考えられる。

以上の結果から、試作した乳質測定装置により、乳脂肪のモニタリングによる生乳の品質評価や飼養管理、乳糖の増減のモニタリングによる乳房炎検知等をオンラインで行う事が可能になると考えられる。よって本技術は大型酪農における個体管理に応用できる技術であると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	川 村 周 三
副 査	教 授	木 村 俊 範
副 査	教 授	松 田 従 三
副 査	教 授	野 口 伸
副 査	准教授	夏 賀 元 康 (山形大学農学部)
副 査	講 師	中 辻 浩 喜

学 位 論 文 題 名

近赤外分光法による搾乳時乳質のリアルタイム測定技術

本論文は、全 6 章からなる総頁数 193 の和文論文である。論文には図 66, 表 61, 引用文献 88 が含まれ、別に参考論文 2 編が添えられている。

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が普及しつつある。一方で乳質や産乳性の向上、乳牛の栄養管理には個体管理が重要である。本研究は大型酪農における個体管理を実現するため、搾乳時における乳質リアルタイム測定技術の確立を目的とした。本研究では近赤外分光法を用いた乳質測定装置を試作し、実用化を想定した検量線の作成とその測定精度の検証を行った。

以下に、論文の内容と審査結果について述べる。

1. 試作した乳質測定装置

試作した乳質測定装置はスペクトル測定部、分光器部、データ処理部、乳量計、試料採取部から構成される。スペクトル測定部では搾乳された生乳に光を拡散透過させ、その透過光を光ファイバで分光器部に送る。測定波長範囲は 600～1050 nm で、1 nm 毎に拡散透過率を測定し、これを生乳スペクトルとした。

2. 試作した乳質測定装置の測定精度

試作した装置の性能を検証するため、搾乳時に流動する生乳のスペクトルを測定し、乳質測定用検量線の作成および精度検証を行った。その結果、乳牛 1 個体および複数個体の生乳の乳脂肪、乳糖、乳タンパク質、体細胞数 (Somatic cell count: SCC)、乳中尿素態窒素 (Milk urea nitrogen: MUN) を精度よく測定する事ができた。よって試作した装置による乳質測定の可能性が示唆された。

3. 検量線の測定精度に影響を与える要因の検討

本装置の実用に際しては、検量線作成試料 (Calibration set) に含まれない乳牛個体や泌乳期間の試料を測定する事が考えられる。そこで安定して高い精度を得られ

るロバストな検量線を作成するために、検量線の測定精度に影響を与える要因について検討を行った。その結果、Calibration set と精度検証試料 (Validation set) で個体や期間が同じ試料が含まれる場合、実用上十分な精度が得られた。一方で個体や期間が異なる場合、乳脂肪は高い精度で測定できたが、乳脂肪以外の乳質では精度が低下した。

4. 検量線による乳質の測定原理

ロバストな検量線作成のため、PLS factorに着目し乳質の測定原理を調べた。

その結果、検量線の PLS factor 1 はいずれの乳質、個体においても乳脂肪の情報を持つ事がわかった。また乳糖と SCC は乳脂肪との高い内部相関により情報が得られていた。

また PLS factor 2 は N-H string を有する乳質の情報を持つ事がわかった。しかし、その情報量が少なくノイズなど他の要因の影響に弱く、実用レベルの検量線としては不十分と考えられた。さらに PLS factor 3 は同じ乳質の検量線でも個体によって異なった。このように普遍性を持たない PLS factor が検量線に含まれる事が、個体等の差異による精度低下の原因と考えられた。

また内部相関が測定精度に関係している事が考えられたため、各乳質間の内部相関を調べた。その結果、内部相関は搾乳 1 回分のデータセットでは高かった。この内部相関は乳質が搾乳の経過によって一定の変動をするために生じると考えられた。また搾乳複数回のデータセットでは乳脂肪と乳糖、乳脂肪と SCC、乳糖と SCC との間では内部相関が高かったが、他の乳質の組み合わせでは相関が低下した。これは泌乳期の進行に伴い、乳質値が変動するためである。そのため Calibration set と Validation set で個体等が異なると内部相関の情報が共有されないため、精度低下が起こると考えられる。従って各乳質間の内部相関の変動や低下も個体や測定期間の変動に伴う測定精度低下の一因と考えられる。

5. 総括

試作した近赤外測定装置により搾乳中に乳脂肪を高い精度で測定できる事がわかった。乳糖は PLS factor 数を調整する事により、ある程度の精度が得られた。乳タンパク質、SCC、MUN は実用を想定した検証では良い精度を得られなかった。これらの乳質を高い精度で測定するためには、測定波長域の再検討が考えられる。しかし波長域を拡大しても乳脂肪以外の乳質の情報を十分に持つスペクトルを測定できないことから、本論文で示された結果が近赤外分光法による生乳乳質のリアルタイム測定を行った際の測定精度の限界と考えられる。

以上のように、試作した乳質測定装置により、乳脂肪のモニタリングによる生乳の品質評価や飼養管理、乳糖の増減のモニタリングによる乳房炎検知等をオンラインで行う事が可能になると考えられ、本技術は大型酪農における個体管理に応用できる技術であると思われる。

よって、審査員一同は川崎正隆が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。