

計測ヘッド分離型近赤外水分センサの開発

本間 稔規, 飯島 俊匡, 高橋 裕之, 澤山 一博,
木村 俊範*, 岡 邦治**, 藤井 宏***, 小松 幸春****

Development of NIR Moisture Analyzer with Interchangeable Sensor Head

Toshinori HONMA, Toshimasa IJIMA, Hiroyuki TAKAHASHI, Kazuhiro SAWAYAMA
Toshinori KIMURA*, Kuniharu OKA**, Hiroshi FUJII***, Yukiharu KOMATSU****

抄 録

食品の製造工程における原材料の水分含有量は製品の品質に大きく影響するため重要な管理項目であり、現状では加工途中の原材料を抜き取り乾燥減量法により測定するのが一般的である。食品製造の効率化、品質向上のためにはオンラインで水分含有量をモニタリングすることが有効と考えられるが、乾燥減量法では前処理を含め測定時間がかかるため、測定結果を製造工程にフィードバックすることができない。また、食品加工工場以外にも原材料となる農産物の収穫適期の判断などに活用したいというニーズが大きい。そこで本開発では、計測ヘッドを換えることにより、様々な食品、食品原料の水分含有量をリアルタイムに計測可能な計測ヘッド分離型近赤外水分センサを開発した。具体的な適用例としてスイートコーンとすりみを取り上げ、それらに適用可能な計測ヘッドの試作開発を行った。

キーワード：近赤外分光，食品の水分含有量，計測ヘッド分離型，リアルタイムモニタリング

Abstract

It is important to control moisture content in foods at manufacturing process, because that content affects food quality significantly. However, standard procedure of measuring moisture content in foods can not yield quick results, therefore there are huge demands for realtime moisture content monitoring technology at production line, and also at making decision when harvesting agricultural products. In this study, we developed real time NIR Moisture Analyzer with Interchangeable Sensor Head, that has capability to evaluate moisture content in various food materials and food products. For a test case, we picked up Sweet Corn and Surimi as specific targets.

KEY-WORDS : Near Infrared Spectroscopy, Moisture content in foods, Interchangeable Sensor Head, Realtime Monitoring

* 北海道大学大学院農学研究院 * Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

** 北海バネ(株) ** Hokkai Spring MFG. CO, LTD

*** 日本罐詰(株) *** Nihon Kanzume, Inc.

**** 大和水産(株) **** Daiwa Suisan Co.

事業名：重点領域特別研究

課題名：道産加工食品の品質および生産効率向上のための多品種対応型水分含有量計測システムの開発

1. はじめに

農水産業などの一次産業が基幹産業である北海道は国内の食糧基地として重要な位置を占めている。収穫した農水産物を原材料の形態で出荷する他に、道内で二次加工し、付加価値を高めた製品として出荷する割合も他都府県平均の10.2%に比べ37.4%と多い¹⁾。近年では食品のおいしさの追求以外に、大きさ、重量などの製品としての均一性に対する要求が高まっており、原材料の品質管理や製造工程ラインでの迅速な品質チェックが重要となってきた。その品質の指標として、食品成分の安定性や微生物の増殖などへの影響が大きい水分含有量が重要である。しかし、乾燥減量法の測定原理による既存の装置では測定時間が非常に長いため、生産効率の向上の妨げになっている。このことについて、道内の複数の食品加工関連の企業や団体などから、加工食品の品質および生産効率向上のためのリアルタイムかつ高精度に測定できる装置の開発に対する強い要望が寄せられている。

食品、農水産物の水分含有量を非破壊で評価する方法として近赤外分光法が有効であり、製造工程などでのモニタリングやスクリーニングの用途に簡便に使用できる特徴がある。近赤外分光法を用いた装置は高精度な測定が可能な実験室用の装置、または特定の測定方法（透過光方式、反射光方式、インタラクタンス方式²⁾など）で、かつ計測対象を限定した専用の装置がほとんどである。さらにこれらの装置価格は百万円から数千万円であるため、中小企業を主とする食品製造業では導入が進んでいない。また、近赤外品質評価装置では測定対象毎に検量線を作成し、それを用いて成分の定量推定を行うことから、装置の経年変化や測定対象の成分変動に対応し、精度維持のための定期的なメンテナンスが必要である。ユーザ自身が検量線のメンテナンスを行うには専門的な知識が必要のため、メーカーと契約を結んで定期的にメンテナンスを行うのが一般的である。さらに、測定データについては、オンライン用装置の場合は、表示された値を確認するだけであったり、装置のメモリに蓄積したデータをパーソナルコンピュータ等に転送して管理するのが一般的であり、データ管理や製造工程へのフィードバックを簡便に構築することは困難である。

そこで本開発では、これらの製造コスト、メンテナンス性、データ活用性に対する課題解決を目的とした計測ヘッド分離型近赤外水分センサを開発した。この水分センサは、測定対象により変更可能な計測ヘッド部と、測定対象によらず共通で使用可能なデータ解析部とに分離した構造とすることで低コスト化を図った。計測ヘッド部とデータ解析部のインターフェイスは無線通信とし、自由に取り回しが可能である。また、データ解析部をインターネットや製造工程の制御用ネットワークに簡便に接続できる構造とすることにより、検量線のメンテナンスや、モニタリング結果の製造工程へフィードバックすることが容易となる。今回は具体的な計測対象とし

て道内企業から相談が寄せられているスイートコーンとすりみを取り上げ、これらをテストケースとして開発を行った。

2. 近赤外分光法を用いたスイートコーンおよびすりみの水分含有量推定

スイートコーンおよびすりみについて、近赤外分光法を用いて実用的な精度で水分含有量推定が可能かどうか、また計測ヘッドに用いる光源と検出器の仕様（分光器+ハロゲン光源の組み合わせ、またはフォトダイオード+LEDの組み合わせ、など）を検討するために検量線作成実験を行った。

2.1 実験装置

スペクトルデータの取得には、超小型分光器（Carl Zeiss製 MMS-1 NIR-enh）とハロゲンファイバ光源（12V/100W）を組み込んだ実験装置（図1）を開発して使用した。スイートコーン、すりみの両サンプルに対して使用可能とするために、実験装置は透過光方式とした。また、水分含有量の実測値はサンプルの乾燥前後の重量差から水分含有量を計算する乾燥減量法により求めた。

透過光方式でスイートコーンを測定するために子実を1粒ずつ取り出し測定した。1粒の重量が約500mg前後であるため、最小分解能0.1mgの電子天秤（島津製作所製AUW220D、図2）を用いた。



図1 実験装置

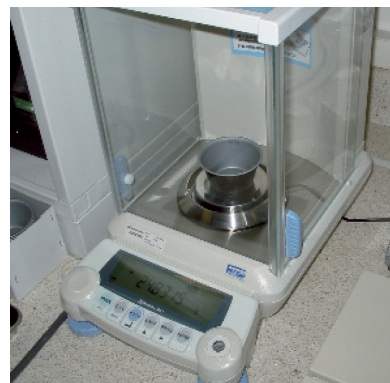


図2 電子天秤

2.2 スイートコーンの実験方法

実験サンプルは芽室産のスイートコーン（品種：ジュビリー）を用いた。コーンサンプルは皮付きの状態のまま保冷剤を入れた発泡スチロール容器に梱包し、クール便にて当地に送付してもらい、発送翌日の午前中に到着したものを実験に使用した。実験手順としては、まず実験直前に皮を取り除き、コーンの中央部から1サンプルにつき10粒を取り出し、あらかじめ秤量したアルミ皿にのせ、電子天秤にて乾燥前重量を測定した。スイートコーンは室内では水分が蒸発しやすく（約0.6%/分、図3）、水分含有量の実測値の誤差の原因となるため、迅速に行う必要がある。乾燥前重量測定後直ちにスペクトルデータを測定した。リファレンスには2mm厚のテフロン板を用いた。スペクトルデータは1サンプルにつき10回測定し、その平均を代表値とした。測定後105℃に設定した通風乾燥機に入れて24時間程度乾燥させた。乾燥終了後、デシケータで室温まで放冷した後に電子天秤にて乾燥後重量を測定した。サンプル数は1日50サンプルで、5日間で合計250サンプルであった。

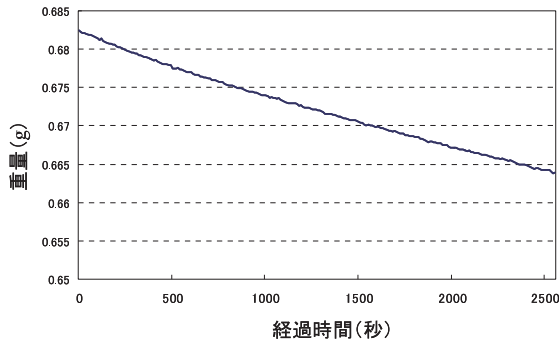


図3 コーンサンプルの水分の蒸発

2.3 データ解析方法

検量線作成用のデータ解析にはPLS（Partial Least Squares）回帰分析を使用した。実験により取得したサンプルのスペクトルデータおよびリファレンスデータから吸光度スペクトルを求め、さらに吸光度スペクトルのベースライン補正、および微小な変化を抽出するために二次微分処理を行った。以上の操作により得られた吸光度二次微分スペクトル（図4）を解析に用いた。

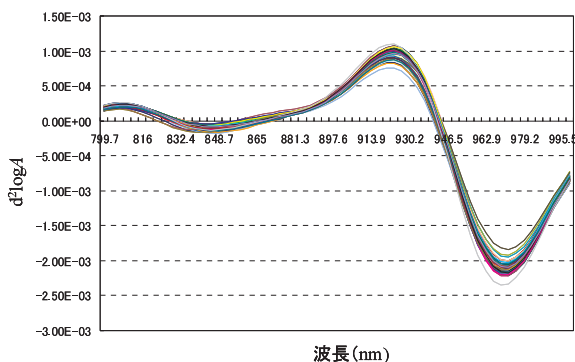


図4 吸光度二次微分スペクトル例

2.4 結果と考察

図5にコーン250サンプルの水分含有量の分布を示す。水分含有量の最小値は66.3%，最大値は75.2%，平均値は71.3%であった。

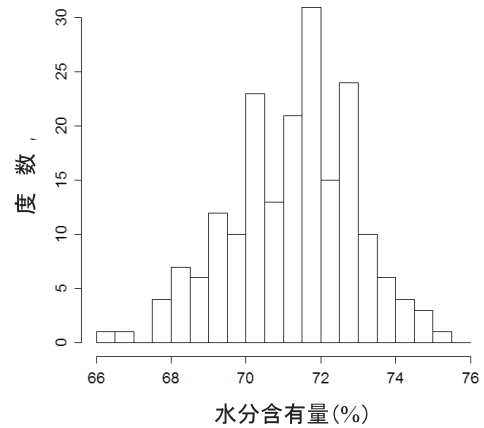


図5 コーンサンプル全体の水分含有量分布

図6に水分含有量の実測値とスペクトルデータから推定した値の関係を示す。得られた検量線については決定係数 R^2 は0.66，キャリブレーション時の標準誤差SECは0.94%であり、十分な性能が得られなかった。この原因を考察するために、全体のサンプルの一部（ある1日分の50サンプル）について検量線作成を行い、全体での検量線と比較した。図7に取り出した50個の水分含有量の分布を示す。水分含有量の最小値は69.3%，最大値は75.2%，平均値は72.2%であり、サンプル全体の分布と大きくは異なっていない。図8に実測値と推定値の関係を示す。得られた検量線については決定係数 R^2 は0.86，キャリブレーション時の標準誤差SECは0.58%であり、サンプル全体を用いた検量線よりも良好な性能が得られた。この原因として、スイートコーンの成長過程における子実の変化³⁾では、大きく変化する成分としてデンプン含量（0%から20%以上まで増加）と硬度（0.7kgから1.6kgまで増加）があるが、これらの成分の変化が光の散乱に影響

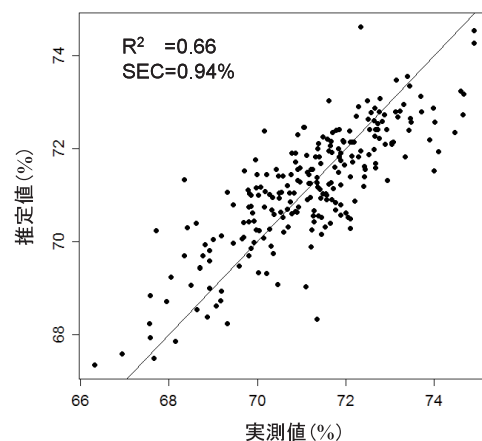


図6 コーンサンプル全体の実測値と推定値の関係

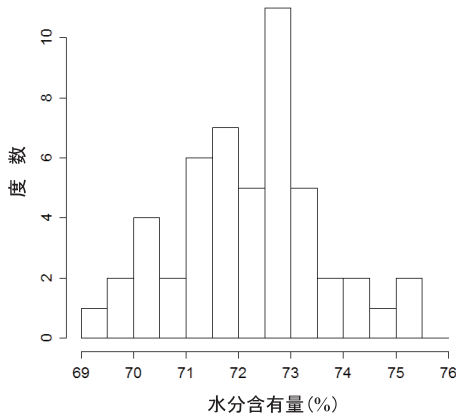


図7 一部のコーンサンプルの水分含有量分布

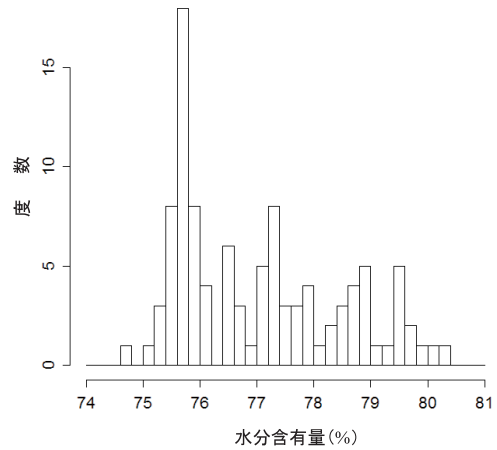


図9 すりみサンプルの水分含有量分布

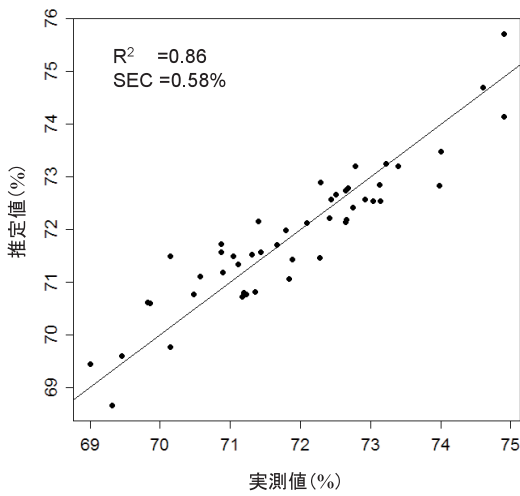


図8 一部のコーンサンプルの水分含有量の実測値と推定値の関係

し、スペクトルデータにバイアス、スキューなどの変動を生じさせていると考える。また、これらの成長過程での変化以外の原因として、収穫後のスイートコーンは呼吸により成分が大きく変化するため³⁾、サンプルを収集し、実験するまでの期間に生じた変動が影響していることが考えられる。

2.5 すりみの実験方法

実験サンプルは冷凍すりみ（品種：中国産タチウオ）を解冻して使用した。解冻は、実験の前日に冷凍庫から3～4℃に設定した冷蔵庫に移して行った。冷凍すりみの水分含有量は均一であると考えられるので、サンプルに蒸留水を適量添加し、十分になじませ、もともとの水分含有量に加えて0～5%程度の範囲になるように調製したものをを用いた。水分含有量の実測値測定については、1サンプルから5つの実測用サンプルを取り、水分含有量の実測値の標準偏差を求め、大きくばらつくサンプルについては除外した。図9に実験に使用したすりみの水分含有量分布を示す。サンプル数は103、最小値は74.8%、最大値は80.2%、平均値は77.1%であった。

実験手順は、まず、すりみをシャーレ（φ35プラスチック製、図10）に隙間ができないように充填し、表面を平らにしてスペクトルデータを測定した。スペクトルデータは1サンプルにつき10回測定し、その平均を代表値とした。スペクトルデータ測定後、シャーレのサンプルから



図10 シャーレに充填したすりみサンプル

水分含有量実測用の5つのサンプルをそれぞれ1g程度取り出し、あらかじめ秤量してあるプリンカップ（図11）に入れ薄く均一にのぼしてから乾燥前重量を測定した。すりみについてもスイートコーンの場合と同様に室内では水分の蒸発速度が大きい（0.04%/分、図12）、作業時間を均一にす



図11 乾燥用プリンカップ

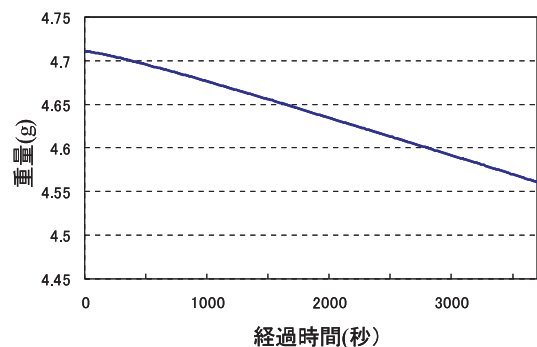


図12 すりみサンプルの水分の蒸発

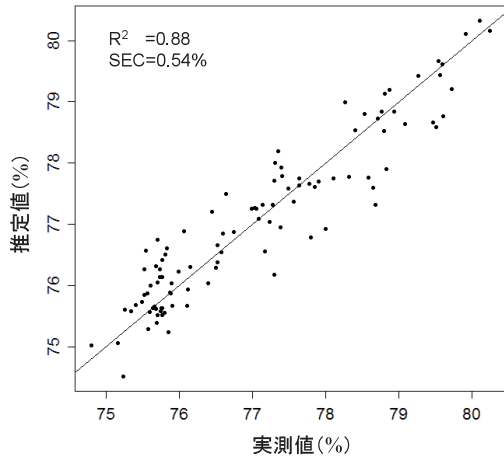


図13 すりみ水分含有量の実測値と推定値の関係

るように行った。105℃に設定した通風乾燥機に入れ、3時間乾燥させた後、乾燥機から取り出しデシケータにおいて室温になるまで放冷してから乾燥後重量を測定した。これらから水分含有量の実測値を得た。図13に実測値と得られた検量線より推定した値の関係を示す。この検量線は、決定係数 R^2 は0.88、キャリブレーション時の標準誤差は0.54%であり、実測値の標準偏差が平均0.16%、最大0.68%であることから実用的な性能が得られた。

3. 計測ヘッド分離型近赤外水分センサ

3.1 計測ヘッド共通の仕様

検量線作成実験から分光器では実用的な性能が得られるが、サンプルの変動が大きい場合、フォトダイオードと複数波長のLEDの組み合わせのような簡便な構成では十分な性能が得られないことがわかった。このことから、計測ヘッドの検出器としてマルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス製C11010MA, 図14）、光源としてハロゲンランプ（KLV製5V/1.35A, 図15）を用いる構成とした。検出器や光源の制御機能、データ解析部との無線通信機能を搭載した電子回路基板を設計、試作した（図16）。スペクトルデータは分光器からアナ



図14 ミニ分光器（浜松ホトニクス C11010MA）

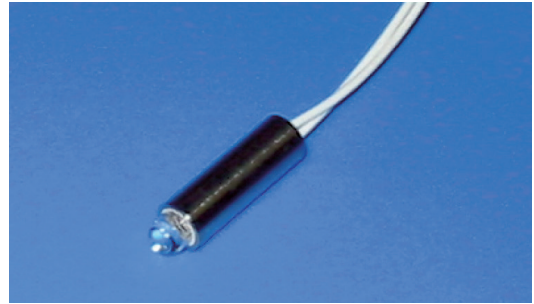


図15 ハロゲン光源

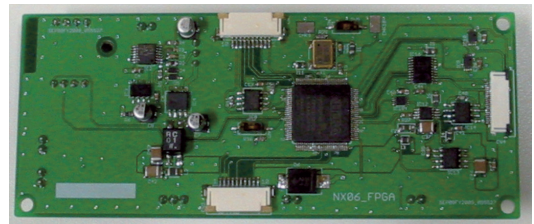


図16 試作した電子回路基板

ログデータとして出力されるため、16bitのADコンバータによりデジタルデータに変換する。また、データ解析プラットフォームとの通信インターフェイスは無線通信とし、無線通信プロトコルにはZigBeeを用いた。計測ヘッドはスペクトルデータを測定し、そのデータをデータ解析プラットフォームに送る機能のみとし、シンプルな構造とした。

3.2 スイートコーン用計測ヘッド

本計測ヘッドは、畑において、子実が軸についたままで、センサを接触させて測定する形状とした（インタラクタンス



図17 インタラクタンス方式

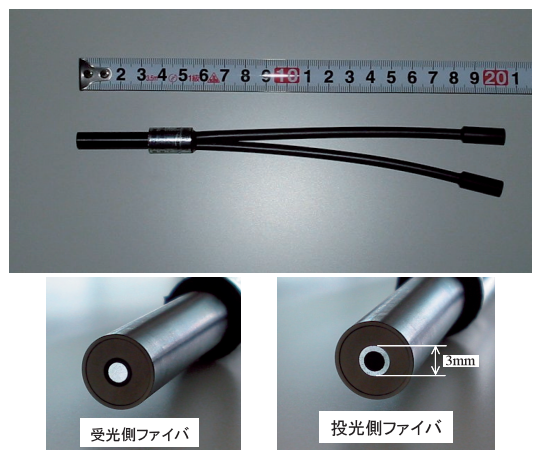


図18 同軸二分岐ファイバ



図19 スイートコーン用計測ヘッド

方式、図17)。本計測ヘッドでは、1粒を測定可能とするために、投光部と受光部のファイバを同軸に配置した二分岐ファイバを設計、試作した(図18)。投光用には外側の環状のファイバを用い、受光用は中心のファイバを用いる。外側の環状ファイバの直径は3mmとした。また、ミニ分光器、ハロゲン光源、二分岐同軸ファイバ、制御用電子回路基板など、計測ヘッドの構成部品を収容する筐体部を設計、試作した(図19)。

3.3 すりみ用計測ヘッド

すりみは半練り状であり、水分含有量の測定は作業者が原材料のすりみの一部をサンプリングして行う。よってすりみ用計測ヘッドはすりみサンプルをホルダに入れ、透過光方式で測定する形状とし(図20)、筐体部の設計・試作を行った(図21)。

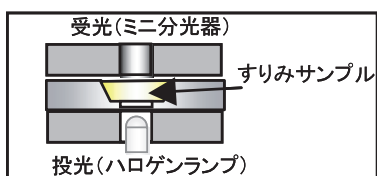


図20 透過光方式

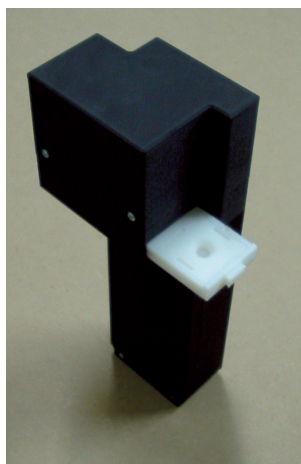


図21 すりみ用計測ヘッド

3.4 データ解析プラットフォーム

データ解析プラットフォームはあらかじめ用意した検量線を用いて、計測ヘッドから送られたスペクトルデータから水分含有量の推定値を計算する。データ解析プラットフォームはインターネットなどの広域ネットワークに接続する機能を持たせることにより、ネットワークを経由したデータ管理が可能となる。また、食品工場の製造工程ラインのネットワークシステムと接続することにより、製造工程のフィードバック制御を構築することができる。さらに、近赤外分光法による品質評価装置は装置劣化、またサンプルの年ごとの変動などにより定期的に測定精度をチェックし、必要に応じて検量線を更新する必要がある。実測値測定については現場で作業する必要はあるが、解析をインターネット経由で行うことによりアップデートが可能となる。また、計測ヘッドとデータ解析プラットフォーム間のデータ通信はZigBeeによる無線通信であるため、1工場内で複数の水分センサを使用する場合には、データ解析プラットフォーム1台に対し、複数の計測ヘッドを用いる構成とすることができ、コストの低減とともに利便性の向上が可能である。

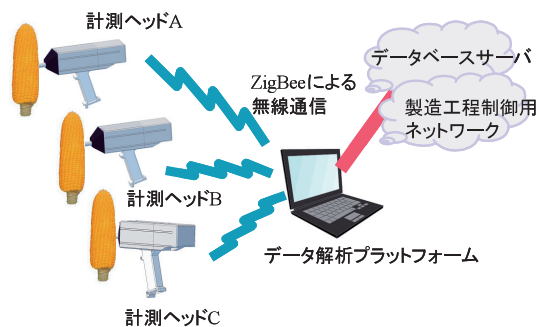


図22 複数台の計測ヘッドとの通信例

4. まとめ

食品およびその原材料の水分含有量をリアルタイムで計測することが可能な近赤外水分センサシステムを開発した。本システムは計測ヘッドとデータ解析部を分離した構造とし、通信インターフェイスとしてZigBeeによる無線通信を採用した。具体的な開発対象をスイートコーンとすりみとし、スイートコーン用のインタラクタンス方式の計測ヘッド、すりみ用の透過光方式の計測ヘッドを試作開発した。

また、スイートコーンおよびすりみの水分含有量推定用の検量線作成実験を行い、推定精度の検討と測定条件の課題について明らかにした。

今後は試作した計測ヘッドを用いてフィールドにおいて実験を行い精度向上を図り、実用化開発を進める。また、今回対象としなかった他の食品などへの適用や、水分含有量以外の成分の評価の可能性について検討を進める予定である。

引用文献

- 1) 平成21年7月 北海道の食品工業の現状, 北海道経済部
商工局産業振興課 (2009)
- 2) Sumio Kawano, Hisayoshi Watanabe, Mutsuo Iwa
moto : Determination of Sugar Content in Intact
Peaches by Near Infrared Spectroscopy with Fiber
Optics in Interactance Mode, J. Japan, Soc. Hort.
Sci. 61(2) pp.445-451, (1992)
- 3) 戸澤英男: トウモロコシー歴史・文化, 特性・栽培, 加
工・利用ー, (株)農山漁村文化協会 p.294, p.331 (2005)