

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25850180

研究課題名(和文)高水分梱包粗飼料の非破壊水分計測技術の開発

研究課題名(英文)Development of non-destructive moisture measurement for high-moisture forage crops

研究代表者

松尾 守展(MATSUO, MORINOBU)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・生物系特定産業技術研究支援センター 畜産工学研究部・主任
研究員

研究者番号：70355113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ベクトルネットワークアナライザで測定した電磁波は、周波数1.7～2.6GHzの間において、導波管へ投入するサイレージの量や密度の増減によらず、位相と振幅との間に直線的な関係があった。また、振幅と位相の傾きは原料水分が高まるにつれて増加し、振幅・位相の比と原料水分とは直線的な関係にあった。ここから、透過電磁波の位相・振幅の傾きを指標とすることで、サイレージ中の水分を非破壊推定できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：A linear relationship was obtained between amplitude attenuation and phase shift regardless of amount or density of silage filled into the waveguide around frequency 2GHz of microwave measured with the vector network analyzer. The gradient of attenuation and phase has increased as moisture content of raw silage rises. Possibility of non-destructive moisture measurement in silage was suggested by the relationship between attenuation and phase of transmitted microwave.

研究分野：飼料調製機械，非破壊計測

キーワード：水分 粗飼料 サイレージ 電磁波 非破壊計測

1. 研究開始当初の背景

国内で生産される飼料の多くは中～高水分状態でロールペールサイレージ等として保管される。サイレージ調製時における水分は発酵品質に大きな影響をおよぼすことから、立毛状態で60～80%に達する原料草に対して、60%以下を目標に圃場内で予乾される、原料草を一定程度まで登熟させる等の水分調整が行なわれる。しかし、天候の影響等により調整後の水分には大きなムラが生じる。また、国産のサイレージを運搬する場合に、原料水分は品質に加えて輸送効率にも影響することから、水分調整に加えて原料水分を適正に把握することが重要となる。現状では、これら飼料の水分測定は、加熱乾燥に伴う原料の質量減少の測定、または他の有機溶剤とともに原料を蒸留した後の定量等により行なわれるが、いずれの方法にしても測定には数時間以上を要する上、材料のサンプリングが必要である。調製後のロールペールに対して上記方法を適用するには表面のラップフィルムをはがす必要があるが、サイレージは嫌気条件下で発酵することから表層のラップフィルムをはがされると外部からの酸素侵入によりカビ発生等の品質劣化が発生する問題がある。

近年は、水田転作の作物として飼料イネ等が広く作付されるようになり、近隣に畜産農家が存在しない地域でも国産粗飼料が生産・流通されるパラダイムシフトが起こりつつある。また、飼料イネに加えてトウモロコシでも「流通基準」が整備され国内での流通促進が期待されている。ここで国産粗飼料の流通を円滑化するには、流通向けに個別やロット別のロールペール品質情報の把握が重要だが、サンプル抜き取りを伴う分析作業、すなわちロールペールの破壊および計測が必要とされるため、簡便で密度の影響を受けない、非破壊水分測定技術が求められている。

2. 研究の目的

電磁波は、周波数が高まると直進性・反射性・物体への吸収性などの現象が顕著になり、特に水分子に関しては22GHz付近で吸収が高まる特性がある。また、この特性を基にして積乱雲等を検出する気象レーダーや土中埋設物を探索する地中レーダー等が開発されている。しかし、これまでロールペール等の飼料に対して電磁波の応答性が解析された例は極めて少なく、適性や問題点等は明らかになっていない。そこで、ネットワークアナライザを用いた測定・解析により水分等の非破壊計測に向けた新たな知見を得る目的で本研究を実施する。

3. 研究の方法

(1) フリースペース法による電磁波測定

予乾時間を変えることで平均含水率20～80%に調製した直径1.2mのロールペール(フィルム巻数:6層, 原料:オーチャードグラス

主体混播草)を供試した。供試ロールペールは室内でターンテーブル上に静置し、リッジホーンアンテナを図1の通り対向させ第一フレネルゾーンが供試ロールペールの中心部を通るように配慮した。電磁波の測定・解析にはベクトルネットワークアナライザ(Agilent Technologies 社:N5224A)を用い、周波数帯は1～25GHzとした。

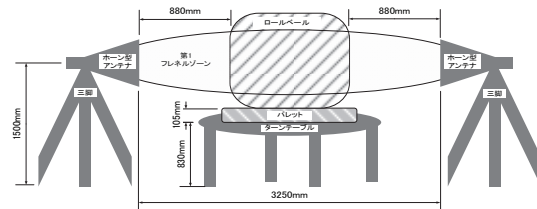


図1 測定レイアウト (フリースペース法)

(2) 導波管法による電磁波測定

収穫・細断後に段階的な加水および乾燥を行ない、32.3～79.3%に水分調整したトウモロコシサイレージ(品種:KD731)をロールペール内よりサンプリング・縮分して供試した。導波管(カットオフ周波数:1.372GHz)の両端に同軸導波管変換器を取付け、セミリジッドケーブルにてベクトルネットワークアナライザ(Hewlett Packard 8719C)へ接続し、導波管をサンプルホルダーとした(図2)。各水分サンプルは、10～300gを導波管に詰込むとともに、密度調整のため適宜圧縮した。ベクトルネットワークアナライザの掃引周波数は1.7～2.6GHzとした。

ベクトルネットワークアナライザでSパラメータ(S21)を測定し、透過電磁波の振幅および位相の変化を求めるとともに、原料水分との関係を検討した。原料水分は、いずれも105℃24時間の通風乾燥法により求めた。

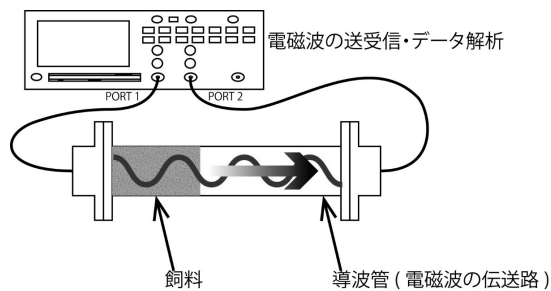


図2 測定レイアウト (導波管法)

4. 研究成果

(1) フリースペース法による電磁波測定

開放空間においてロールペールを透過させた際の電磁波の透過減衰は、周波数が高まるにつれて顕著な減少傾向が認められた(図3)。また、15GHz周辺を越えると透過減衰はいずれのロールペールでも-60dBを下回り、自由空間における損失(-24～-47dB)を加算すると-100dB程度以下と極めて微弱な波形となった。周波数が高まるにつれてフレネルゾーンが狭くなり、回折等により伝搬する成分が減少したためとも考えられた。

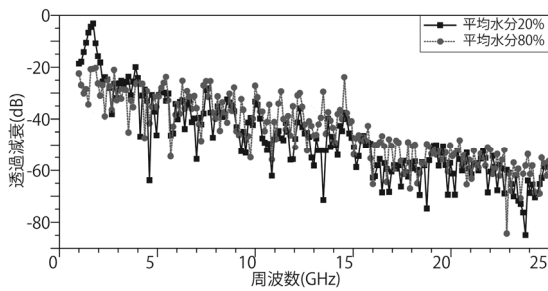


図3 開放空間での透過電磁波の測定例

屋外における回折の影響を除くため、電波暗室内にて小型ロールベール（直径 0.5m）を供試して 1~13GHz で測定したところ、原料水分と電磁波の透過減衰との間には明確な関係性が認められなかった（図4）。また、いずれのロールベールにおいても電磁波の多重反射による減衰の大きな変動が認められた。ここから、開放空間でホーンアンテナを活用したフリースペース法ではロールベール内水分と関連の高い指標を得るのは困難であった。

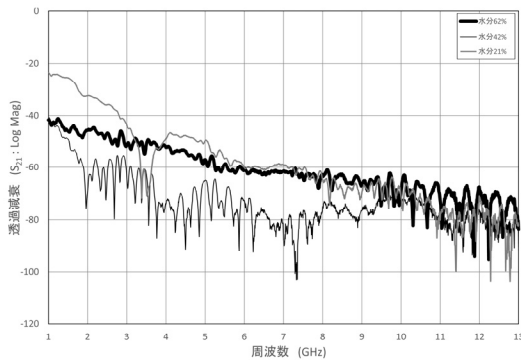


図4 電波暗室内での透過電磁波の測定例

(2) 導波管法による電磁波測定

これまでの実験において、透過電磁波の減衰のみからの飼料作物中の水分測定は困難であったことから、導波管を用いた小規模な実験系にて、電磁波の減衰と位相変化を合わせて測定・解析することとした。

同一水分（60%）のサイレージを少量ずつ導波管に封入し、導波管内の原料容積・質量・密度を逐次変化させ周波数 1.7GHz・2.0GHz・2.3GHz で測定した際に得られた S21 データより求めた振幅および位相の変化を図5に示す。

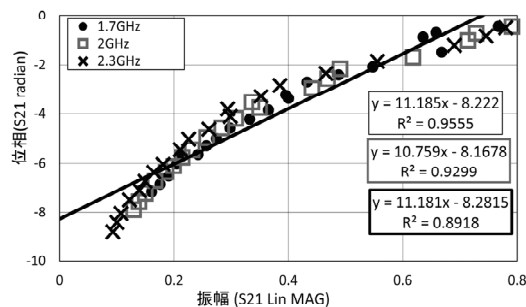


図5 水分 60%のトウモロコシサイレージにおける振幅と位相の関係

X 軸は送信波からの減衰を比で示したものの、Y 軸は送信時を 0 として位相をラジアン換算したものである。原料の投入量および密度を徐々に高めていくにつれて、振幅は送信時と比べて減衰するが、位相も同様に变化する傾向が得られた。また、減衰が 0.1~0.8 程度の範囲においては振幅と位相の変化の間に直線的な関係性が認められた（図5）。すなわち、導波管内への投入質量および密度が異なっても、同一水分のサンプルから得られる振幅・位相の比は一定であった。

この結果をもとに、段階的に水分を変化させたトウモロコシサイレージを供試して、周波数毎に振幅と位相の傾きを求めた（図6）。

供試した周波数範囲においては、いずれの周波数帯においても透過電磁波の位相・振幅の傾きは原料水分の増加に従い高まる傾向にあった。また、水分との関係性については周波数が低いほど高まる傾向にあった。ここから、透過電磁波の位相・振幅の比を指標とすることで、原料水分を非破壊計測できる可能性が示唆された。

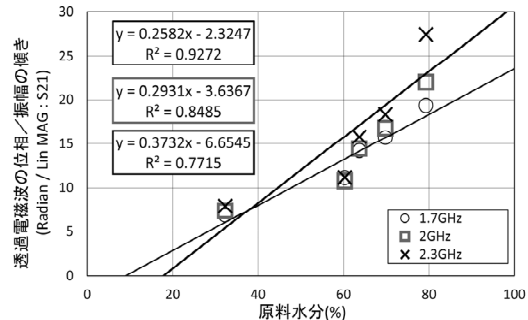


図6 トウモロコシサイレージにおける位相/振幅の傾きと水分との関係

以上、高水分な飼料を対象にした内部水分の非破壊計測技術の開発を目標として電磁波を活用した実験・検討を行ない、以下の知見を得た。

①フリースペース法により透過電磁波の測定を試みたところ、ロールベール透過に伴う多重反射と推察される影響を受け安定的な測定が困難であることが明らかとなった。

②導波管内に無作為に飼料を投入したところ、同一水分サンプルにおいて透過電磁波の振幅・位相の傾きは一定で、水分変動に応じて変化することが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

①松尾守展, 浦川修司, マイクロ波を活用したロールベール内水分非破壊計測技術の検討—周波数帯およびデータ解析方法の検討—, 第73回農業食料工学会年次大会講演要旨, 2014年5月17日, 琉球大学(沖縄県中頭郡西原町)

②松尾守展, 堀部雅弘, 加藤悠人, 橋保宏, トウモロコシサイレージにおける電磁波

伝搬特性と水分との関係－周波数 2GHz 周辺での検討－, 2015 年度日本草地学会信州大会, 2015 年 3 月 26 日, 信州大学伊那キャンパス (長野県上伊那郡南箕輪村)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 守展 (MATSUO MORINOBU)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構, 生物系特定産業技術研究支援センター, 畜産工学研究部, 主任研究員

研究者番号 : 70355113