

# TDR 方式簡易水分計によるロールベールの適切な測定部位の検討および重量推定への応用

浅岡壮平\*・山口昇一郎・馬場武志

九州沖縄農業研究センターを中心とした福岡県を含む研究グループは 2016 年に TDR (Time-Domain Reflectometry: 時間領域反射測定法) 方式による新たなロールベールサイレージ用の簡易水分計を開発した。今回、イタリアンライグラスおよびイネホールクroppサイレージのロールベールの上部、中央部および下部の水分含量、突刺抵抗値および TDR 測定値を調査し、簡易水分計の測定に適切な部位を検討した。ロールベール中央部で TDR 測定値と水分含量の相関が最も高かったため、測定部位として中央部が適切と判断した。また、ロールベール体積、TDR 測定値、突刺抵抗によるロールベール重量の推定を行った。同一機器で調製され梱包密度が同様なイタリアンライグラスでは良好な推定精度が得られたものの、さらなる精度向上のために梱包密度の指標を検討する必要があると思われた。

[キーワード: ロールベール, 簡易水分計, 測定部位, 重量推定, TDR]

Examination of Proper Measurement Point and Weight Estimation based on Measurement Value of Simplified Moisture Meter for Roll Bales. ASAOKA Sohei, Shoichiro YAMAGUCHI and Takeshi BABA (Fukuoka Agriculture and Forestry Research Centre, Chikushino, Fukuoka 818-8549, Japan) *Bull. Fukuoka Agric. For Res. Cent.* 4: 97-101 (2018)

In 2016, a new simplified moisture meter for roll bales using the time-domain reflectometry (TDR) system was developed by our research group in cooperation with The NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center. In the present paper we discuss the appropriate measurement point for the new moisture meter by investigating the moisture content, piercing resistance value and TDR. These values were measured at the upper point, middle point and lower point of roll bales of Italian ryegrass silage and rice whole crop silage. The correlation between moisture content and measured TDR value was highest at the middle point; thus, the middle point was judged as most suitable for measurement. We then constructed an equation to estimate roll bale weight using the measured TDR value, and the piercing resistance as an index of roll bale packing density and volume. The equation for Italian ryegrass silage showed high accuracy. This may be because all sample roll bales of Italian ryegrass silage were prepared by same machine and had a similar packing density. Therefore, to improve the proposed equation, a new index of packing density needs to be investigated.

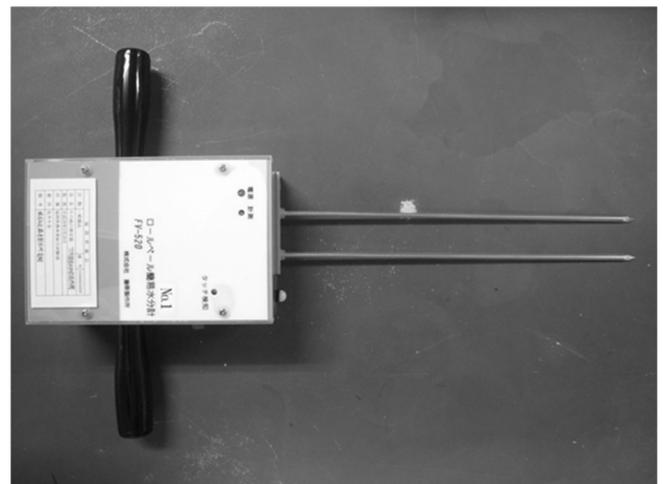
[Key words : roll bale, simple moisture meter, measurement point, estimate of weight, TDR]

## 緒言

粗飼料を含む輸入飼料価格が高止まりする中 (農林水産省 2017b), 国や関係機関等により国内飼料生産基盤の強化が図られており, 畜産農家に代わり飼料作物の生産作業を行うコントラクター組織等による粗飼料の広域流通が推進されている (農林水産省 2017c)。

福岡県での粗飼料生産は, 従来はほとんど畜産農家による自家生産・消費であった。しかし, コメの生産調整の主力作物としてイネホールクroppサイレージ (以下「イネ WCS」とする) の耕畜連携による生産が増加する一方 (農林水産省 2012, 農林水産省 2017a), 畜産農家側では高齢化や後継者不足による農家戸数の減少, 経営安定のための大規模化により労働力が不足する中, 県内でもコントラクターの設立が増えている (福岡県 2017a)。そのため, 福岡県酪農・肉用牛近代化計画書でも農家の労働負担の軽減のためにコントラクター組織の育成を推進することが謳われている (福岡県 2017b)。藤森ら (2015) は, 需要者はコントラクターに対し一定品質を求める声が強いことを報告しており, コントラクターの利用を推進するために, 品質の評価指標の一つである水分含量を現場で簡易に測定する機器の開発が必要であった。そこで, 九州沖縄農業研究センターを中心とした福岡県を含む研究グループでは, TDR (Time-Domain Reflectometry: 時間領域反射測定法) 方式を採用したサイレージ用簡易水分計の開発に取り組んだ (服部ら

2015)。TDR 方式は, 水分子の誘電率が他の物質に比べ非常に高い原理を利用しており, サイレージ中の水分量の多少で検査試料の誘電率が変化するため, サイレージに刺された二本のセンサーロッド周辺の飼料の誘電率により水分量を推定するものである。開発した水分計は 2016 年 6 月に (株) 藤原製作所より市販されており (第 1 図), 誤差 4 ポイント以内で精度は高い (服部ら 2016)。



第 1 図 ロールベール簡易水分計 FV-520

現在のサイレージ調製は、円筒形に成型した牧草をストレッチフィルムで密封したロールベールラップ体系が主流であるが、この水分計の測定はロールベール側面の上中下 3 箇所行うことが推奨されている（服部ら 2016）。しかし、測定により穴をあけると保存性が低下すること、特に高密度ロールベールではセンサーロッドの下穴開けに労力を要することから、測定箇所は少ないほうが望ましい。ロールベール中の水分分布にはムラがあることが報告されており（野中ら 1995）、測定部位で水分含量が異なることが予見されるため、最少の測定回数で水分が推定できる部位を明らかにする必要がある。

また、サイレージの水分含量に加え、ロールベールの重量もロールベール取引において重要な項目の一つである。ロールベール重量は、その体積と梱包密度および水分含量に高い相関があると思われるが、サイレージ簡易水分計による計測の際、梱包密度の指標としてプッシュプルゲージにより突刺抵抗を測定するため、加えて体積を測定すれば、ロールベール重量を推定できる可能性がある。

そこで、本研究では、ロールベールの測定部位ごとの水分含量や突刺抵抗を調査し、簡易水分計の測定に適切な部位を検討するとともに、ロールベール体積、突刺抵抗とサイレージ簡易水分計測定値によるロールベール重量の推定の可能性を検討した。

## 材料および方法

### 1 供試ロールベールの概要

試験は、農林業総合試験場内および県内畜産農家で生産されたロールベールを用いた。イタリアンライグラスは全て 2015 年春に収穫されたもので、供試個数は 19 個であり、うち場内産が 16 個、畜産農家産が 3 個であった。品種は全て普通種であった。収穫ステージは場内産が全て出穂期、畜産農家産は全て開花期だった。なお、畜産農家産の 3 個は重量および体積を未測定だったため、重量の推定には場内産 16 個のデータを用いた。

イネホールクロップサイレージ（以下「イネ WCS」とする）は全て 2015 年秋に収穫されたもので、供試個数は 20 個であり、うち場内産が 7 個、畜産農家産が 13 個だった。品種は場内産が全て「たちすずか」であり、畜産

農家産は「たちすずか」が 7 個、「ヒノヒカリ」が 4 個、「夢つくし」が 2 個だった。収穫ステージは場内産が糊熟期 3 個、完熟期 4 個であり、畜産農家産は糊熟期 4 個、黄熟期 5 個、完熟期 1 個、不明が 3 個だった。

### 2 簡易水分計による測定

ロールベールの測定部位と手順を第 2 図に示す。測定は、イタリアンライグラスの場内産 16 個は 2015 年 7 月 7 日～10 月 28 日の間に随時行い、畜産農家産 3 個は 2015 年 7 月 2 日に行った。イネ WCS の場内産 7 個は 2016 年 1 月 7 日～1 月 22 日に随時行い、畜産農家産 13 個は 2016 年 1 月 17 日と 2 月 23 日に集中的に行った。

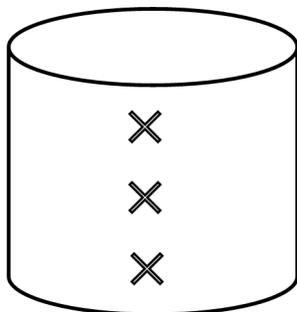
測定部位はロールベールサイレージ 1 個につき、側面中央部（以下「中央部」とする）、側面上端部と中央部の中間点（以下「上部」とする）、下端部と中央部の中間点（以下「下部」とする）の 3 か所とした。

まず、水分計センサーロッド挿入口の下穴開けを兼ね、プッシュプルゲージ（メカニカルフォースゲージ FB、株式会社イマダ、豊橋）に先端にナイフ状の刃がついた長さ 36 cm の金属棒を装着したものをロールベールの各測定部位に根元まで約 2 秒かけてゆっくりと突き刺し、突刺抵抗を 2 回測定し、平均値を突刺抵抗値とした。次に、（株）藤原製作所製ロールベール簡易水分計 FV-520 試作機（以下「水分計」とする）のセンサーロッドを地面と水平に、センサーロッド付け根のタッチセンサーが反応するまで突き刺して 2 回測定し、平均値を TDR 測定値とした。

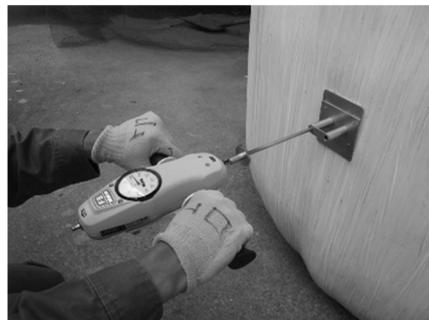
### 3 水分、重量および体積の測定

水分計で測定した 3 部位から、電動ドリルに装着したフィードサンプラー（藤原製作所、東京）により、深さ 30cm 程度まで試料を採取し、速やかに通風乾燥機で 60℃48 時間以上乾燥させ、試料の水分含量を求めた。

また、ロールベールの重量および体積を測定した。重量は、動物用体重計 Smart Scale 200（Gallagher 社、ニュージーランド）のロードバー上にパレットを敷き、その上にロールベールを置いて測定した。体積は、牛体測定器ホル協式 NFK60（富士平工業、東京）によりロールベールの短径および長径、ロールベール上面までの高さを計測し、 $\text{短径}/2 \times \text{長径}/2 \times \pi \times \text{高さ}$ として求めた。



a) ロールベールの測定部位



b) ガイドに沿いプッシュプルゲージを突き刺す（下穴開けを兼ねる）



c) 下穴に水分計のセンサーロッドを挿入、計測

第 2 図 ロールベールの測定部位と測定手順

## 4 統計処理

ロールベールの測定部位による違いを検討するため、上部、中央部および下部の各調査項目についてFriedman検定を行い、有意な項目については、Scheffeの方法による多重比較を行った。

### 結果および考察

#### 1 ロールベールの部位による水分含量等の偏り

ロールベールの部位別の水分含量、突刺抵抗値およびTDR測定値を第1表、第2表に示す。

水分含量は、イタリアンライグラスでは上部、中央部、下部の各部位間に差が認められなかったものの、イネWCSでは下部に比べ上部が有意に高かった。なお、両草種とも、全てのロールベールで排汁の発生や破れによる外部からの水の侵入は認められなかった。

野中ら(1995)は、白色フィルムのロールベールでは表層部の下端で水分が高かったが、黒色フィルムロールベールの日なた側では表層上端で水分が高かったことを報告しており、ロールベール表面での温度変化により水分移動が起きていると推察している。しかし、今回の試験では、イタリアンライグラスのサンプリングは夏から秋にかけ断続的に行ったのに対し、イネWCSのサンプリングはより日射量が少なく、温度変化の少ないと思われる冬期に行っており、イネWCSの水分含量の偏りの原因は明確でない。

一方、ロールベールの梱包密度の指標である突刺抵抗値は、イタリアンライグラス、イネWCSともに、上部に比べ中央部が有意に高かった。ロールベール収穫体系では、牧草はウインドローを形成した上でロールベールにより収穫されるため、両端部に比べ中央部の草量が多くなる。そのため、中央部の梱包密度が高くなり、その指標である突刺抵抗値の数値が上がったものと思われる。また、TDR測定値も、イタリアンライグラス、イネWCS

第1表 イタリアンライグラス各調査項目の測定部位ごとの差異

	上部	中央部	下部
水分含量(%)	46.5 (8.9)	45.9 (9.6)	45.6 (9.5)
突刺抵抗値(N)	136.4 (29.7) a	168.6 (64.1) b	142.8 (37.6) ab
TDR測定値(kHz)	47.2 (3.0) a	46.3 (2.8) b	47.1 (3.6) ab

- 1) n=19
- 2) 各項目の小文字異符号間に5%水準で有意差あり
- 3) 数値は平均値、()内は標準偏差を示す

第2表 イネWCS各調査項目の測定部位ごとの差異

	上部	中央部	下部
水分含量(%)	44.0 (16.8) a	44.0 (16.9) ab	42.8 (16.8) b
突刺抵抗値(N)	197.3 (73.8) a	270.9 (85.2) b	235.4 (76.1) ab
TDR測定値(kHz)	53.2 (5.8) A	51.6 (5.4) B	52.7 (5.2) AB

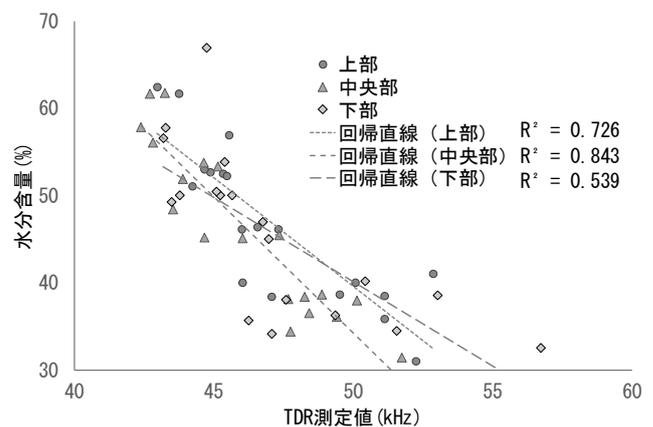
- 1) n=20
- 2) 各項目の大文字異符号間に1%水準で有意差あり
- 3) 各項目の小文字異符号間に5%水準で有意差あり
- 4) 数値は平均値、()内は標準偏差を示す

ともに上部に比べ中央部が有意に低かった。服部ら(2007)の報告では、実乾物率が同じでも梱包密度が低いと、誘電率の平方根が低くなることが示されている。TDR測定値は誘電率の変換値であるが、誘電率とは逆数の関係にあるため、今回の試験において、梱包密度の指標である突刺抵抗値が高い中央部でTDR測定値が低くなったことは、前述の報告と合致する。

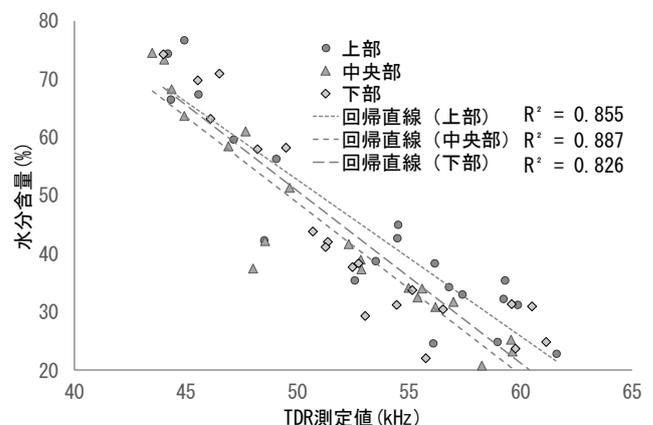
#### 2 水分計の適切な測定部位の検討

水分計の測定部位としては、実測の水分含量とTDR測定値の相関が高い部位を選択することが適切と思われる。そのため、測定部位ごとにTDR測定値を説明変数、実測の水分含量を目的変数とする単回帰分析を行い比較した(第3図、第4図)。

イタリアンライグラス、イネWCSともに中央部が最も決定係数 $R^2$ の値が高く、当てはまりが良かった。イネWCSでは水分含量が上部で高く、下部で低かったが、中央部は上部および下部に対し有意差はなく、中央部の測定数値がロールベール全体の中間的な数値を示している。そのため、水分計の測定に際しては、中央部が適切と思われる。



第3図 イタリアンライグラスのTDR測定値と水分含量との関係



第4図 イネWCSのTDR測定値と水分含量との関係

第3表 水分計による重量推定式

重量推定式	補正決定係数 $R^2$	誤差率 <sup>3)</sup> (%)		予測区間(%)	
		平均	標準偏差	70%	95%
イタリアン <sup>1)</sup> ライグラス 重量(kg) = $-8.54 \times \text{TDR測定値(kHz)} + 588.7$	0.75	0.3	6.4	7.1	14.1
イネWCS <sup>2)</sup> 重量(kg) = $246.0 \times \text{体積(m}^3\text{)} - 8.25 \times \text{TDR測定値(kHz)} + 420.2$	0.87	2.2	17.3	18.8	37.0

1) ロールベールのサイズ 直径107.9cm~120.6cm, 高さ89.0cm~101.0cm, 体積0.852m<sup>3</sup>~1.075 m<sup>3</sup>

2) ロールベールのサイズ 直径101.0cm~135.5cm, 高さ83.0cm~123.0cm, 体積0.689m<sup>3</sup>~1.709 m<sup>3</sup>

3) 誤差率 = (推定重量 - 実測重量) / 実測重量

### 3 TDR 測定値によるロールベールの重量推定

ロールベール体積, ロールベール中央部の突刺抵抗値, TDR 測定値を説明変数, ロールベール重量を目的変数とする重回帰式を求め, ロールベール重量の推定可能性を検討した。なお, 回帰式に採用する説明変数は変数増加法により決定した。

ロールベールのサイズは, イタリアンライグラスでは直径 107.9cm~ 120.6cm, 高さ 89.0cm~ 101.0cm, 体積 0.852m<sup>3</sup>~ 1.075m<sup>3</sup>, イネ WCS では直径 101.0cm~ 135.5cm, 高さ 83.0cm~ 123.0cm, 体積 0.689 m<sup>3</sup>~ 1.709 m<sup>3</sup>であった。

イタリアンライグラスでは, 説明変数として TDR 測定値のみが採択され, 1%水準で有意な回帰式が得られた。補正重決定係数  $R^2$  は 0.75 であり, 得られた回帰式による予測重量と実測重量の誤差率の平均は 0.3%, 標準偏差は 6.4, 予測区間は 70%で± 7.1%, 95%で±14.1%だった。イタリアンライグラスでは重量推定に用いたサンプルが試験場産のロールベールのみであり, 同一機器による収穫でサイズがほぼ一定であったため, 体積が説明変数として採用されなかったものと思われた。

また, イネ WCS では, 説明変数としてロールベール体積および TDR 測定値が採択され 1%水準で有意な回帰式が得られた(第 3 表)。補正重決定係数  $R^2$  は 0.87 であり, 得られた回帰式による予測重量と実測重量の誤差率の平均は 2.2%, 標準偏差は 17.3, 予測区間は 70%で±18.8%, 95%で±37.0%だった。

イタリアンライグラス, イネ WCS とともに, 突刺抵抗値は説明変数に選択されなかった。プッシュプルゲージは, おおまかな梱包密度の目安とはなるものの, 金属棒を突刺してその圧を計測する。そのため, 金属棒先端の繊維の形状や, 茎等の固い部分への突刺しなど(阿部ら 2015), 梱包密度以外の要因でもその数字は変動し, バラつきが大きいため, 重量推定への寄与度が大きくならなかったものと思われた。

イタリアンライグラス, イネ WCS とともに決定係数  $R^2$  は 0.7 を超えており, 高い相関が認められたが, 誤差率の予測区間はイタリアンライグラスでは比較的低値であり, 精度は良好と思われたが, イネ WCS では高く, 推定精度をより向上させる必要があると思われた。イタリアンライグラスは同一機器による調製であったため, 梱包密度も各ロールベールで近似であるが, イネ WCS は調製

機器も様々であったため, 梱包密度もバラつきが大きかったことが推察される。ロールベールの梱包密度は重量推定に大きく影響すると思われ, 突刺抵抗値に代わる梱包密度の指標について, 今後再検討する必要があると思われた。

なお, 本研究は, 農研機構生物系特定産業技術研究支援センター「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急開発展開事業」の支援を受けて行った。

### 引用文献

- 阿部菜奈子・日高康志・服部育男・井上浩一・山下憲男・浅岡壮平・深川聡・中村寿男・高橋奈津美・森徹・東政則・下副田充志・松野愛子・城田圭子・末永晋一(2015) 県産流通粗飼料における品質評価法の確立. 大分県農林水産研究指導センター畜産研究部平成 27 年度試験成績報告書 45:12-16
- 藤森英樹・伊藤和子・関野幸二(2015) 稲発酵粗飼料の広域流通とその成立要因—主に畜産経営調査から—日本草地学会誌 60(4):256-263
- 福岡県(2017a) 福岡県酪農調整審議会会議資料. 農林水産部畜産課, 福岡, [http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/261982\\_52574664\\_misc.pdf](http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/261982_52574664_misc.pdf) (2017年 8 月 30 日閲覧)
- 福岡県(2017b) 福岡県酪農・肉用牛生産近代化計画書. 農林水産部畜産課, 福岡, [http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/265302\\_52610682\\_misc.pdf](http://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/265302_52610682_misc.pdf) (2017年 8 月 30 日閲覧)
- 服部育男・佐藤健次・加藤直樹・蔡義民・徐春城・守谷直子(2007) 11-2 飼料イネの非破壊品質評価および栄養価推定法の開発—揮発性成分—. 新鮮でおいしい「ブランド・ニッポン」農産物提供のための総合研究 3 系畜産(プロジェクト研究成果シリーズ 45 1). 農林水産省農林水産技術会議事務局, 東京, p 62-64.
- 服部育男・長尾かおり・藤原基次・加藤直樹・小林良次・城田圭子・井上浩一・山下憲男・指田勝美(2015) ロールベールサイレージの流通促進のための迅速な水分測定手法. 日本草地学会誌 60(4):268-274
- 服部育男(2016)現場で簡易に測定可能なサイレージ水分

- 測定計. 畜産技術 733 : 7-11
- 野中和久・名久井忠(1995) ストレッチフィルムの色が低水分ロールペールサイレージの発酵品質・結合蛋白質に及ぼす影響. 北海道草地研究会会報 29 : 68-72
- 農林水産省(2012) 平成 23 年耕地及び作付面積統計. 大臣官房統計部生産流通消費統計課面積統計班, 東京, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000012810963> (2017 年 8 月 30 日閲覧)
- 農林水産省(2017a) 平成 28 年耕地及び作付面積統計. 大臣官房統計部生産流通消費統計課面積統計班, 東京, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000031547634> (2017 年 8 月 30 日閲覧)
- 農林水産省(2017b) 飼料をめぐる情勢 (データ版). 生産局畜産部飼料課, 消費・安全局畜産安全管理課, 東京, [http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l\\_siryo/attach/pdf/index-139.pdf](http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/attach/pdf/index-139.pdf) (2017 年 8 月 30 日閲覧)
- 農林水産省(2017c) 飼料をめぐる情勢 (イラスト版). 生産局畜産部飼料課, 消費・安全局畜産安全管理課, 東京, [http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l\\_siryo/attach/pdf/index-145.pdf](http://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryo/attach/pdf/index-145.pdf) (2017 年 8 月 30 日閲覧)