研究資料

圃場における乾草生産の所要エネルギー

坂井直樹*・春原 亘*・角田公正**

The Required Energy in Hay Making on a Field

Naoki SAKAI, Wataru SUNOHARA and Kosei TSUNODA

1 緒 言

天日を利用して乾草を生産する方式は各所でわれているが、従来これに関するエネルギーの収支を圃場で実際に測定した報告は必ずしも多くない。このことは、既存の各種牧草利用システムにおける所要エネルギーの解析や、新しい牧草生産・利用システムを設計する際などに不都合となる場合がある。著者らは、原料草の刈取から梱包（収納時）までの一連の乾草生産工程において、トラクタや乾燥機が消費した燃料および作業時間を比較的詳細に測定したので、今回資料として報告する。

一口に天日を利用した乾草生産方式といっても地域や時期による違い、原料草の種類や保有する機械・施設の違い、さらには経営形態や規模の違いなどによりその内容も多岐にわたっている。従って本稿は一つの事例を示すに過ぎないが、従来まとまった形で報告がそれほど多くないことを考えると、多様な条件下においてこのような測定データを蓄積していくことは、今後の技術展開を図る上で意義あることと思われる。

なおこの分野における既往の研究としては、線形計算モデルを用いて、乾草生産・サイレージ

生産の諸形態における作業時間・所要エネルギーなどを比較しているKjelgaardの報告¹⁾や、アルファルファの「刈取」・「圧砕」工程を対象に、種々の方式による乾燥速度・収穫ロス・燃料消費量の違いを調べているRotzらの報告³⁾がある。

2 実験装置と方法

1) 本稿で扱うエネルギーの範囲：乾草生産に投入されるエネルギーには、日射エネルギーと補助投入エネルギーとがある。さらに、補助投入エネルギーは直接分と間接分とに分類されるが、本稿では系へ投入されるエネルギーとして、日射と直接エネルギー（燃料・電力）だけを対象とした。天日乾燥においては、日射量の多少だけでなく、風速や湿度なども乾燥速度に関係するが、ここではそれらのうちで乾燥熱源として考えやすい日射のエネルギーだけを扱った。また、燃料のもつエネルギーには動力としての利用、および燃焼による乾燥熱源としての利用があるが、本稿では両者を分けて扱った。

2) 実験場所と期間：東京大学農場（田無市）内の火山灰土壌で土性は壤土（L）の圃場に、面積20a（100m×20m）の区画を設定し、1981年5月26日から6月1日の6日間にかけて実験を

昭和62年10月8日受理

* 東京大学農学部附属農場 東京都田無市緑町1-1-1 〒188

** 明治大学農学部 神奈川県川崎市多摩区東三田 〒214

* Experimental Farm, The University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188

** Faculty of Agriculture, Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214

第1表 作業工程と作業方法

作業工程	作業機	実施日	オペレータ	作業人員
刈 取	ディスクモア	5/26	A	1
圧 砕	ヘイコンディショナ	"	A	1
転 草①	ジェミニテッダ	5/27	A	1
" ②	"	"	B	1
" ③	"	"	A	1
" ④	"	5/29	A	1
" ⑤	"	"	B	1
" ⑥	"	"	B	1
集 草	サイドレーキ	"	A	1
梱 包	ルースベアラ	"	A	1
積 込	トレーラワゴン	"	C	5
火力乾燥	クロップドライヤ	5/30	—	1
再 梱 包	タイトベアラ	6/01	—	2

注：1) 作業人員は面積20a当たりの値（単位は人）。

2) 火力乾燥と再梱包はともに定置で作業した。

第2表 作業機の型式と理論作業幅

作業機	型 式	理 論 作業幅
ディスクモア	International 3104	1.5 m
ヘイコンディショナ	New Holland 401-5	1.3
ジェミニテッダ	Lely	3.1
サイドレーキ	Massey Ferguson 812	1.8
ルースベアラ	Massey Ferguson 8	1.3
トレーラワゴン	New Holland	—
クロップドライヤ	New Holland 751	—
タイトベアラ	Massey Ferguson 503	1.3

第3表 圃場乾燥期間中の気象データ

月 日	降雨量 (mm)	日射量 (KJ/cm ² ・day)	温度(℃)		湿度(%)	
			最高	最低	最高	最低
5/26	0	2.34	26.8	11.8	90	47
5/27	0	2.40	24.4	13.8	91	55
5/28	0	0.63	20.2	14.5	97	77
5/29	0	2.21	27.5	15.8	97	65

行った。当场では、主に天候との関係で乾草生産は毎年この時期に行われることが多い。

3) 供試作物：2番草のイタリアンライグラス（初期水分88.7%wb）を供試した。

4) 作業工程と供試作業機：マッセイ・ファーガソン製トラクタ(MF135, 35 kw)を供試して、一連の圃場作業を行った。作業工程の中で、「転草」は反復が多い作業であるのでとくに個人差をみるためにこれを選び、ベテランのオペレータ2人が作業を分担するという形をとった。作業工程と作業方法を第1表に、また作業機の型式と理論作業幅を第2表に示す。

5) 測定項目

試料水分：圃場では、作業の切れ目ごとに圃場全面から5点ずつ水分測定用の試料を採取し、これらの平均値を試料水分とした。また、燃焼時間が正味6時間であった「火力乾燥」工程では、測定のためにトラックスケールの上にトレーラワゴン（牧草を積載したまま乾燥室として機能する）を移動して秤量した。乾燥開始時、3時間経過時、および6時間経過時（乾燥終了時）にそれぞれ秤量し、試料の水分変化を計算により求めた。

燃料消費量：圃場作業時にトラクタが消費した燃料（軽油）は、搭載の積算体積型の燃料計²⁾を用いて測定した。この実験における測定値は、「作業」と「回行・調節」という中味の分離をとくに行っていない総括的な値である。火力乾燥中にクロップドライヤ（送風用として7.5 kwの電動機を装着）が乾燥熱源として消費した燃料（軽油）は、燃料タンクを台ばかりの上に置いて連続的に秤量した。なお、クロップドライヤが発生する熱風は吹き出し口（直径が約1.2 mの円形）付近で温度は50.4℃、風速は18.2 m/sであった。温度・風速ともに14測点の平均値である。

その他の項目：実験期間中の気象データ、およびクロップドライヤが消費した電力を測定した。

3 結果および考察

1) 実験期間中の天候

圃場乾燥期間（5月26日～29日）中の気象データを第3表に示す。5月28日だけが曇天で、雨量計に検知されない程度の微量の降雨があったが、その他の3日間はほぼ晴天であった。

2) 作業結果

第1図 作業結果(面積20a分)

作業時間・試料水分・燃料消費量の変化を、作業の流れに合わせて第1図に示す。図に示した作業時間と燃料消費量の値は、面積20aで測定された生データである。20aの面積から生産された乾草は圃場乾燥後のルースペーラによる「梱包」工程で100個の梱包となり、さらに火力乾燥後のタイトペーラによる「再梱包」工程で48.5個に圧縮され、そのまま収納された。

第1図で、刈取から再梱包までの一連の工程における合計の作業時間(作業+回行+調節および定置の合計時間)は571.7分となっていた。その内訳をみると、「火力乾燥」が360.0分と圧倒的に多くの時間(全体の約63%)を占めており、ついでサイドレーキによる「集草」、タイトペーラによる「再梱包」、ヘイコンディショナによる「圧砕」、ロータリモアによる「刈取」などがそれぞれ1工程20~30分程度の時間で続いていた。1工程中に6回行ったジェミニテッドによる「転草」

は、いずれも1回の作業に11分程度の時間を要した。

試料水分の変化をみると、工程の進行に伴い水分は次第に低下していた。とくに、「転草」では1回の作業ごとに確実に水分が低下していた。

また、一連の作業工程における合計の燃料消費量は158.47kg(面積20a分)であった。その内訳をみると、「火力乾燥」は圧倒的に燃料多消費工程であり、これだけで153.00kg(全体の96.5%)の燃料を消費していた。しかし、当地の気象条件下ではよほど条件が良好でないと天日乾燥だけで短期間に安全な貯蔵域まで水分を低下させることが難しいため、良質な乾草を得るには火力乾燥を仕上げ用として併用することがしばしば行われてきた。乾燥生産における「火力乾燥」工程は、本事例に限らず多くの点で検討すべき問題を内在していることはいうまでもない。

これに比べると、圃場作業においてトラクタが

第4表 圃場における各工程の作業状況と燃料消費量

工 程	定常速度 (km/h)	走 行 回 数		エンジン回転 速度 (rpm) ②	燃 料 消 費 量	
		L ①	S ①		(kg/ha)	(kg/h)
刈 取	5.9	14	0	1328	3.59	1.84
圧 砕	4.7	14	0	1459	3.57	1.74
転 草①	5.4	7	0	1621	1.30	1.47
“ ②	5.8	9	0	1536	1.74	1.87
“ ③	5.6	9	0	1250	1.54	1.55
“ ④	5.0	8	0	1157	1.46	1.47
“ ⑤	6.9	11	0	1900	1.95	2.05
“ ⑥	7.0	11	0	1810	1.87	1.95
集 草	4.8	17	4	1280	3.27	1.24
梱 包	2.3	4	0	1349	1.76	2.38
積 込	1.6	4	0	1208	1.34	1.03
合 計	—	108	4	—	23.39	—

注：1) Lは長辺方向 (100m) の走行回数, Sは短辺方向 (20m) の走行回数で, とものに回行は含まない。

2) エンジン回転速度は「作業+回行+調節」における平均値で, トラクタ搭載の積算回転計により測定した。

第5表 圃場における各工程の作業時間の内訳

工 程	作 業	回 行	調 節	合 計
刈 取	70.1	40.4	5.8	116.3
圧 砕	89.3	28.4	5.5	123.2
転 草①	38.8	8.8	5.3	52.9
“ ②	46.7	9.1	0	55.8
“ ③	48.2	11.4	0	59.6
“ ④	48.1	11.2	0	59.3
“ ⑤	48.2	8.5	0	56.7
“ ⑥	47.5	9.8	0	57.3
集 草	113.8	41.0	3.3	158.1
梱 包	54.0	9.0	19.3	82.3
積 込	70.6	7.2	0	77.8
合 計	675.3	184.8	39.2	899.3

注：1) 単位は分 (min)。

2) 各値とも面積 20 a 当たりを 1ha 当りに換算した。

消費した燃料はごく少量であったが, 工程設計・管理上はいずれも重要な項目なので, 第4表には「単位面積当たり」と「単位時間当たり」という二つの面からみた燃料消費量を示す。ここで, 定常速度とは「回行」・「調節」を除いた真の「作業」時の平均速度と定義し, ストップウォッチによる時間測定のデータ (20 a 分) から求めたものである。表をみると, 「刈取」や「圧砕」および「集草」では面積当たりの燃料消費量が多いが, 時間当たりの燃料消費量は他の作業とほぼ同様であった。

つぎに, 圃場における作業時間の工程別内訳を第5表に示す。表をみると, 圃場作業の中で「集草」が最も多くの時間を要していたが, これは主に走行距離の差によるものであった。作業機の性格上, 調節時間の割合は「梱包」が最高であった。

なお, 「転草」におけるオペレータ2人の作業結果を比較すると, エンジン回転速度の設定値や長辺方向の走行回数にやや個人差ともいふべき違いがみられ, それが作業時間や燃料消費量の差となって現れていた。しかし, この場合の走行回数の違いは単に個人差だけではなく, 水分の低下に伴って生じてくるジェミニテッダの有効作業幅の変化や, 実験のための特殊状況といえるかもしれないが, 区画した供試圃場の境界付近に飛散した

第6表 3種類の「乾燥／（日射・直接エネルギー）比」の比較¹⁾

項 目	天 日	火 力	天日＋火力計
乾燥エネルギー			
除去水分量	$21.4 \times 10^3 \text{ kg}$	$1.8 \times 10^3 \text{ kg}$	$23.2 \times 10^3 \text{ kg}$
蒸発潜熱 ²⁾	2.44 MJ/kg	2.38 MJ/kg	—
合 計	$52.2 \times 10^3 \text{ MJ (E1)}$	$4.3 \times 10^3 \text{ MJ (E2)}$	$56.5 \times 10^3 \text{ MJ (E3)}$
投入エネルギー			
日射エネルギー	$485.6 \times 10^3 \text{ MJ}$	—	$485.6 \times 10^3 \text{ MJ}$
トラクタの燃料	$1.1 \times 10^3 \text{ MJ}$	—	$1.1 \times 10^3 \text{ MJ}$
乾燥機の燃料	—	$35.2 \times 10^3 \text{ MJ}$	$35.2 \times 10^3 \text{ MJ}$
電 力	—	$0.8 \times 10^3 \text{ MJ}$	$0.8 \times 10^3 \text{ MJ}$
合 計	$486.7 \times 10^3 \text{ MJ (F1)}$	$36.0 \times 10^3 \text{ MJ (F2)}$	$522.7 \times 10^3 \text{ MJ (F3)}$
乾燥／（日射・直接 エネルギー）比			
$\eta 1 = E1 / F1$	$0.11 (47.5)^{4)}$	—	—
$\eta 2 = E2 / F2$	—	$0.12 (0.12)^{4)}$	—
$\eta 3 = E3 / F3$	—	—	$0.11 (1.53)^{4)}$

注：1) 各値とも面積 20 a 当たりを 1 ha 当たりに換算した。

生草水分 = 88.7 % wb

火力乾燥開始水分 = 42.4 % wb

火力乾燥終了水分 = 11.6 % wb

乾草生産量(乾物) = 3010 kg/ha

2) それぞれ 25°C と 50°C における水の蒸発潜熱。

3) 軽油の発熱量を 46.0 MJ/kg とした。

4) () 内は日射エネルギーを除いて計算した値。

牧草の処理などとも関係しているようであった。

3) 乾燥／（日射・直接エネルギー）比

測定データを天日乾燥部分と火力乾燥部分とに分けて両者のエネルギー効率を比較するために、指標の一つとして考えた、「乾燥／（日射・直接エネルギー）比」（従来の用語には該当するものがないため、本稿ではこのように仮称した。分母には、日射・燃料・電力の各投入エネルギーが含まれる）を計算した。ここでは、① $\eta 1 = E1 / F1$ 、② $\eta 2 = E2 / F2$ 、③ $\eta 3 = E3 / F3$ という、3種類の「乾燥／（日射・直接エネルギー）比」を定義したが、いずれも単位量のエネルギーで除去できる水分量を表し、この値が大きいほど乾燥時のエネルギー効率が高いということになる。記号 E は除去水分と蒸発潜熱とから計算した乾燥エネルギーを、記号 F はそのために投入した種々のエネルギーを表す。番号 1～3 はそれぞれ「天日」・「火力」・「天日＋火力」を表す。

このように計算した結果を第6表に示す。表か

らわかる特徴は、投入されたエネルギー（日射・燃料・電力の合計値）中に占める日射エネルギーの割合が圧倒的に高く、ついで割合はかなり低下するけれども乾燥機が消費した燃料エネルギーがこれに続いているということである。トラクタが圃場作業で消費した燃料エネルギーは、これら二つに比べるとごく少量であった。天日乾燥方式では日射エネルギーの寄与がきわめて大きいために、この項目を入れた $\eta 1$ 、 $\eta 2$ 、 $\eta 3$ 間には大差がないという結果であった。しかし、他の項目とはやや性格を異にする日射エネルギーを除いて $\eta 1 \sim \eta 3$ を改めて計算し直すと（表中の（）内に値を示す）、天日乾燥が分担した部分は乾燥が進みやすい高水分領域なのでその点の有利性を考慮しても、天日部分の「乾燥／（日射・直接エネルギー）比」は火力部分の概略 400 倍という大きな値であった。

ところで、このように乾燥のエネルギー効率という点できわめて有利な圃場天日乾燥に対して、

引用文献

- 1) Kjelgaard, W. L. (1979). Energy and Time Needs in Forage Systems. Trans. ASAE 22(3): 464-469.
- 2) 坂井直樹他 (1981). 圃場実験用のトラクタ燃料計の試作. 農作業研究 42: 51-55.
- 3) Rotz, C. A. and D. J. Sprott (1984). Drying Rates, Losses and Fuel Requirements for Mowing and Conditioning Alfalfa. Trans. ASAE 27(3): 715-720.

Summary

To enrich energy data in the hay making systems with solar energy, we measured fuel consumption and working time of tractor and dryer for a serial processes on a field from Mowing to Re-baling.

1) Working time of the heated air drying process was 63% of the total time, and fuel consumption of this process was 97% of the total fuel, so this process which consumed a lot of petroleum had a serious problem.

2) The total fuel consumption in the several working processes on a field was less than that in the heated air drying process. Fuel consumption per unit area in Harvesting, Conditioning and Raking were larger than those of other working processes.

3) $\eta 1$ (the part of solar drying) was about 400 times as large as $\eta 3$ (the part of heated air drying) from the calculation except for the contribution of solar energy.

いくつかの内在する問題点を指摘することができる。すなわち一般に天日乾燥は、①天候に直接左右され不安定なシステムとなりやすいこと、②乾燥速度が低く乾燥に多くの時間を要すること、③気象条件が良好な季節、あるいは良好な地域でないと貯蔵水分までなかなか水分が低下しないこと、④圃場からの牧草回収率がやや低い（収穫ロスが多い）と推察されることなどが問題点として考えられる。しかし、たとえこれらの難点があっても自然エネルギーを積極的に利用するという有利性は魅力あるものであり、圃場での乾草生産を安定したシステムとして今後確立していくためには、データの集積とともに、まだ多くの研究課題が残されているように思われる。

本実験の遂行に当たり、東京大学農場高塚清一・衛藤邦男・稲生英夫の各技官をはじめ多くの当場職員には測定に協力していただいた。また、農林水産省草地試験場中川西弘之研究室長には本草稿に目を通していただいた。ここに記して謝意を表する。

4 摘 要

著者らは圃場における乾草生産方式を対象に、原料草の「刈取」から「梱包」（収納時）までの一連の作業工程において、日射エネルギーとともに、トラクタや乾燥機に投入された直接エネルギー（燃料・電力）を測定し、乾燥のエネルギー効率を調べた。

1) 「火力乾燥」工程は合計の作業時間の63%を、合計の燃料消費量の97%を占めていたことから、この工程の取扱いが問題であった。

2) 火力乾燥に比べて、圃場作業でトラクタが消費した燃料はごく少量であった。「刈取」・「圧砕」および「集草」工程では、面積当たりの消費量は多かったが、時間当たりの消費量は他と同様であった。

3) 天日乾燥方式では、合計の投入エネルギー中に占める日射エネルギーの割合が圧倒的に高いため、 $\eta 1$ 、 $\eta 2$ 、 $\eta 3$ 間には大差がなかった。しかし、日射エネルギーを除いて各比の値を改めて計算し直すと、 $\eta 1$ （天日部分）は $\eta 3$ （火力部分）の約400倍という、高い乾燥のエネルギー効率を示した。