研究報文

水田地帯におけるトウモロコシ子実の収穫乾燥工程の策定と 所要エネルギーの推定

稲野一郎*・石井耕太*・木村義彰*・竹中秀行**

*北海道立総合研究機構 中央農業試験場, **北海道農業機械工業会

Formulation of the Process and Estimating of the Energy Required for Harvesting
and Drying of the Shelled Corn in the Paddy Field Areas

Ichiro INANO*, Kota ISHII*, Yoshiaki KIMURA* and Hideyuki TAKENAKA**

*Hokkaido Research Organization Central Agricultural Experiment Station

**Hokkaido Agricultural Machinery Manufacturers Association

水田地帯におけるトウモロコシ子実の収穫作業能率、乾燥速度から、収穫機稼働可能日数を計算し、収穫乾燥総所要エネルギーを推定した。収穫には現有の普通コンバインにコーンヘッダを装着し、乾燥には米麦の乾燥に使用している 80 石遠赤外線乾燥機を用いた。生産法人が所有する乾燥機を 3 台使用する条件と 4 戸の農家が所有する乾燥機を利用する条件で作業工程をシミュレーションすると、収穫乾燥工程に要する日数が 2 日から 1 日に変わる時の子実水分が異なった。収穫開始日の子実水分と収穫乾燥総所要エネルギーの関係から、子実水分が 30% 以下では収穫乾燥総所要エネルギーは増加するが、収穫乾燥工程が 2 日単位から 1 日単位に変わる子実水分以下では、収穫乾燥総所要エネルギーは低下した。

キーワード：遠赤外線乾燥機、作業シミュレーション、収穫乾燥所要エネルギー、普通コンバイン

1. 緒言

昨今、原油価格の高騰によって、各国でバイオエタノールの生産が増え、原料となるトウモロコシの価格が高騰したことから、輸入に頼っている配合飼料の価格に多大な影響を与えており、飼料自給化の機運が高まっている。このことに加え農水省では自給率向上のため飼料米など飼料の自給化を推進し、さらに経営所得安定対策では水田を活用した飼料生産に対し交付金を交付することで、国産飼料の生産意欲を高めている。

北海道内の水田転換畑では秋まき小麦の長期連作を解消し、小麦・大豆に続く第 3 の輪作作物を模索している中、飼料用トウモロコシ（以降トウモロコシと表記）の実穫り栽培が注目された。トウモロコシの実穫り栽培は交付金に加え、トウモロコシ子実販売による収益があり、さらに子実以外の茎葉を土壌に鋤き込むことで土壌物理性の改善も期待できる。

トウモロコシに関する国内の試験研究では昭和 30 年代に密植多肥栽培法、昭和 40~50 年代にピッカーシェラを利用した収穫技術や乾燥特性の試験が行われた（北海道農業試験場 1972a, 1973a, 1976a）。北海道内では、トウモロコシ子実の収穫は、昭和 40 年代までコーンピッカによる収穫後、手またはハスカーによって苞皮を取り除いていた（我妻ら 1969）。昭和 50 年前後に養豚組合がピッカーシェラを導入し、一時的に栽培面積の増加が

2017 年 5 月 8 日受付

2017 年 10 月 28 日受理

Corresponding author

稲野一郎 Ichiro INANO

〒069-1395 北海道夕張郡長沼町東 6 線北 15 号

Naganuma, Hokkaido Yubari-gun 069-1395, Japan

E-mail : inano-ichiro@hro.or.jp

図1 トウモロコシ収穫に用いたコンバイン

あった。しかし、収穫した苞皮付き雌穂は、積み重ねると発熱して品質が低下するため、できるだけ風通しの良い乾燥小屋にて自然乾燥する方法がとられてきたが、これらの作業体系は多くの費用と労働時間が必要であった。そのため、乾燥特性試験や常温通風乾燥試験が行われたが（北海道農業試験場 1972b, 1973b, 1976b）、人工乾燥は普及せず、国内の生産量は徐々に減少するとともに試験研究も縮小した。

現在、欧米のトウモロコシ子実の収穫は、コーンヘッダを装着した普通コンバインによる高能率作業が行われている。北海道の水田地帯においても小麦収穫用に導入した普通コンバインと米麦用循環式乾燥機を用いれば、コーンヘッダのみを新たに導入することで低コスト収穫乾燥体系が確立できる可能性がある。

本報では、水田地帯における現有機械を利用した時の効率的なトウモロコシ子実の機械収穫と乾燥工程をシミュレーションし、営農計画立案時の参考とするため子実水分に対応した収穫から乾燥に係わる時間、それらから導き出された収穫機の年間稼働可能面積と収穫・乾燥に係わる消費エネルギーを示す。収穫にはコーンヘッダを取り付けた直流式普通コンバインを用い、収穫時の作業能率と燃料消費量を調査した。また、乾燥には米麦用に利用されている循環式遠赤外線乾燥機を使い、乾減率を求めた。これらの調査結果を基に収穫乾燥工程のシミュレーションを行い、調査を行った生産法人で現有の乾燥機を使用したときの子実水分に対応したエネルギー所要量を算出し、収穫開始日の子実水分（以下、初期子実水分）と収穫期間における収穫乾燥エネルギー消費量の合

表1 供試普通コンバイン機体主要諸元

作業幅	(mm)	4,500
作業畦数		6
エンジン型式		CAT3126B
総排気量	(cc/ 気筒)	7,200/6
出力 / 回転数	(kW/rpm)	191/2,100
タイプ・列数		ラズパー・8
シリンダ直径	(mm)	600
シリンダ幅	(mm)	1,700
ストローウォーク		6連・4段
〃 面積	(m ²)	7.5
シーブ面積	(m ²)	5.8
グレンタンク	(m ³)	8.6

計値（以下、収穫乾燥総所要エネルギー）の関係について明らかにした。さらに普通コンバインは生産法人以外では共同利用が多く、トウモロコシ子実栽培導入時のコンバインの利用費用を算出するため、年間の稼働可能面積と収穫乾燥総所要エネルギーを求めた。

2. 材料および方法

1) 普通コンバインの収穫作業能率と燃料消費量

収穫試験は2010年10月21日に空知管内栗山町（A圃場）、11月6日に由仁町（B圃場）において実施した。A圃場は198 m × 72 mの矩形で1.43 ha、B圃場は長辺221.1 m・253.2 m、短辺47.8 m・57.5 mの区画で1.13 haの面積であった。AおよびB圃場で栽培されたトウモロコシの品種は「39H32、パイオニア」である。A圃場では収穫したトウモロコシ子実はいりばり端に駐車したダンプトラックに荷降ろしし、乾燥施設まで運搬した。B圃場ではスチールコンテナに収穫物を収納し、トラックで運搬した。収穫機は普通コンバイン「LEXION 540C, CLAAS」を用い、コーンヘッダ「LINER 6-75FC, CLAAS」（畦幅75 cm、6畦用）を装着した（図1）。表1に機体諸元を示す。コーンヘッダでは、回転する2本のスナップローラ間に茎が挟まり、スナップローラ上部で雌穂が分離される。スナップローラ下部にはチョッパが装備され、茎葉が細断される。雌穂はコンバイン内部で子実が分離・選別され、苞皮や穂軸は機外へ排出される。コンバイン本体にはコーン収穫用アタッチメントとシリンダ減速キットが装着され

表2 供試乾燥機主要諸元

処理量	トウモロコシ (t)	1.4~10.1
	(容積重 705 g/L)	
通風部容積 (m ³)		1.35
乾燥方式		熱風・遠赤外線
送風機 型式名		LFMF-5
種類		斜流式
常用回転速度 (rpm/Hz)		1,420/50
バーナ 型式名		GK-100D
種類		ガンタイプ
点火方式		自動放電点火
燃焼量 (L/h)		10
使用燃料		JIS1 号灯油
遠赤外線放射体		高効率放射塗料
設置位置		熱風炉内
定格電圧 (V)		三相 200
最大同時使用電力 (kW)		3.58

ている。ここでは収量(水分 15%換算),子実水分,作業能率,燃料消費量を計測した。収穫機の燃料消費量は容積式流量検出器「FP-2140H, 小野測器」に接続したデジタル流量計「FM-1500, 小野測器」のアナログ出力(L/h)を1秒毎に作業能率測定のストップウオッチと同期させたデータロガ「GL800, グラフテック」に記録した。1時間あたりの燃料消費量,面積あたりの燃料消費量は記録データを1秒あたりの燃料消費量に換算し,作業内容毎に積算するとともに,その合計値を作業時間,作業面積で除して算出した。

2) 米麦用乾燥機によるトウモロコシ子実の乾燥

循環式遠赤外線乾燥機「NCD80DF, 山本製作所」(80石用)容量 14.4 m³ (表2)を用い,収穫したトウモロコシ子実を乾燥した。供試機にはトウモロコシの乾燥プログラムが設定されていないため,熱風温度の上限値のみを 50℃に設定した。乾燥中の温度制御は熱風炉内の温度が設定値に達するまでバーナを燃焼させ,その後は設定温度が維持できるようにバーナの燃焼を自動制御した。子実水分,熱風温度,外気温・湿度,穀温,送風量,容積重を調査した。乾燥時の燃料消費量は灯油消費量膜式積算流量計「NDR-6, 金門製作所」で,電力量は「クランプ電力計 3165, 日置電機」

で計測した。本報における子実水分は 105℃, 24 h 乾燥法で求めた。

3) 収穫乾燥作業日数の推定

収穫機の作業能率とトウモロコシ子実乾燥時の乾減率を基礎数値とし,トウモロコシの栽培を行っている栗山町の T 農業生産法人(以下, T 生産法人)内の乾燥施設を例に循環式遠赤外線乾燥機「NCD80DF」(80石用)を3台利用するときの乾燥時間を推定し,排出終了時刻を算出した。収穫機は1台を使用し,早朝の収穫は夜露が付いた雌穂がコンバイン内の選別精度に影響することと乾燥開始時間が夜間になると外気温が低いことを考慮し,収穫時間を9時から17時まで限定した。コンバインによる収穫損失は2か年,子実水分 25~30%の範囲で計 10 回調査をし,1回だけ 1.1%,残りは1%未満と軽微であったため,収穫可能量を推定する時に収穫損失は考慮しなかった。また,子実水分が高くなると未脱損失の増加が推察されるため,本報のシミュレーションの適応水分を 30%以下とした。作業工程シミュレーションは乾燥機1台毎に収穫,投入,乾燥,排出時刻を示した作業工程を作図することによって行った。その時の制約条件は,乾燥機への投入・排出は1度に乾燥機1台しか対応できないため,収穫時刻,乾燥機への投入および排出時刻が重複しないこととした。本生産法人ではトウモロコシの収穫乾燥作業以外の作業もあり,乾燥機1~2台分だけの収穫・乾燥は労働力を配分するうえで生産法人全体の作業効率が低下することから,1回の作業工程で乾燥機3台分の収穫を行っており,本シミュレーションでもこれに倣った。作業シミュレーションの変動要因として乾燥機1台当たりの投入量は最大投入量の 97%容積とし,子実水分と容積重の関係から算出した。また,圃場における子実水分の変化は気象条件に影響を受けることを考慮し,2010年のA圃場とB圃場に加えて,2009年のT生産法人所有の2圃場(2009①, 2009②)で測定した値を用いた。2009①圃場の品種は「39M48, パイオニア」で,他の圃場は「39H32, パイオニア」であり,これら2品種の早晚性は早生中である。子実水分の変動は,2009①圃場では10月13日,23日,28日,11月5日に,2009②圃場では10月23日,11月5日に,2010

年 A 圃場では 9 月 27 日, 10 月 5 日, 13 日, 21 日に, B 圃場では 9 月 27 日, 10 月 13 日, 11 月 6 日に採取した 5 株の平均値で示し, 各年の水分低下傾向を直線回帰式で表した. シミュレーションの結果から子実水分に対応した乾燥後の排出終了時刻を計算し, 子実水分に対応した 1 回の収穫乾燥工程に要する日数 (以下, 1 工程日数) を表 3 に示す条件によって決定した.

同様の条件で複数のトウモロコシ栽培農家が収穫機を共同利用し, フル稼働する場合を想定し, 個々の農家所有の乾燥機 (T 生産法人と同型機種と仮定) を利用した時の作業工程を収穫時刻と収穫機の移動時刻が重複しないよう作図し, 必要乾燥機台数を求めた. 乾燥機台数に応じた乾燥後の排出終了時刻を算出し, 子実水分に対応した 1 工程日数を算出した.

さらに T 生産法人と収穫機を共同利用する条件における収穫機稼働日数は 1 工程日数と月別作業可能日数から算出した.

4) 収穫乾燥総所要エネルギーの推定

作業工程シミュレーションに基づき, 初期子実水分を変えた時の収穫乾燥総所要エネルギーを推定した. 収穫所要エネルギーは収穫時の子実水分に対応した乾燥機 1 台当たりの子実投入量換算面積と収穫試験時の燃料消費量から算出した. また, 乾燥所要エネルギーは, 収穫時の子実水分と仕上がり水分 15%, 乾燥機投入量から算出した水分除去量に乾燥試験で得られた水 1 kg 除去消費エネルギーを乗じて算出した. これらの値から初期子実水分に対応した収穫終了日までの収穫乾燥総所要エネルギーおよび収穫期間内の収穫機 1 台の収穫可能量 (以下, 総乾燥子実収穫可能量) の関係を示した. なお, 本論では収量, 収穫可能量は流通時の標準子実水分 15% に換算した値を用い, 他の水分で表記する場合は説明を加えた.

3. 結果

1) 普通コンバインの収穫作業能率と燃料消費量

トウモロコシ収量は A 圃場で 9.05 t/ha, B 圃場は 10.82 t/ha であり, 2 圃場の平均は 9.94 t/ha であった (表 4). 図 2 に 2009 年 (T 生産法人所有 2 圃場) と 2010 年 (A・B 圃場) の子実水分の経過を示す. 2009 年 10 月 13 日の子実水分は 32.4% で同年の平均水分低下率は 0.118%/日,

表 3 1 工程日数の決定方法

	作業工程	所要時間 (h)	作業時刻
1 日目	収穫	1	9 時から 17 時
	投入	1	10 時から 18 時
	乾燥	子実水分により変動	
	排出	2	乾燥時間により変動
2 日目	・ 1 工程日数が 1 日: 収穫から排出までの作業時刻が 1 日目と同じパターン		
	・ 1 工程日数が 2 日: 収穫から排出までの作業時刻が 1 日目より遅れるパターン		

表 4 トウモロコシの収量

圃場	収穫時本数 (本/ha)	収量 (t/ha) 子実*
A	83,215	9.05
B	79,365	10.82

* 水分 15.0% 換算
品種は両圃場とも「39H32」

図 2 圃場におけるトウモロコシ子実水分の変化 (注) 近似式の変数 x (日付) は 9 月 20 日を $x = 0$ とする.

2010 年の同日では 2 圃場の平均で 27.4%, 0.176%/日であった. 収穫及び乾燥試験を行った 2010 年は降水量が少なく, 晴天が続いたため乾燥が進み, 11 月 6 日には 22% まで低下した.

A 圃場の収穫時の平均作業速度は 5.4 km/h,

表5 普通コンバインによるトウモロコシ収穫作業能率

圃場	面積 (ha)	作業速度 (km/h)	全作業時間 (h)	作業の内訳 (%)					作業能率 (ha/h)
				収穫	旋回	排出	移動	待機	
A	1.43	5.4	1.13	51	13	20	11	5	1.26
				54	14	20	12		1.32
B	1.13	5.8	1.02	41	8	27	16	8	1.11
				44	8	30	18		1.20

注1) 各圃場の下段は待機時間を除いた値

注2) A 圃場の区画は 198 m × 72 m の矩形, B 圃場の区画は長辺 221.1 m・253.2 m, 短辺 47.8 m・57.5 m

表6 収穫作業時の燃料消費量

圃場	作業 時間 (h)	作業 面積 (ha)	燃料消費量の内訳 *						(L) (L/h)	時間当たり 燃料消費量 (L/h)	面積当たり 燃料消費量 (L/ha)	収穫所要 エネルギー (GJ/ha)
			収穫	旋回	排出	移動	待機	合計				
A	1.13	1.43	24.3	4.1	2.3	1.3	0.3	32.3		28.4	22.6	0.81
			42.2	27.2	5.8	17.9	5.9					
B	1.06	1.13	17.1	2.5	1.6	5.1	0.4	26.7		25.2	23.6	0.84
			41.0	31.8	5.8	30.0	4.6					

* 上段：燃料消費量の積算内訳 (L), 下段：各工程の燃料消費量 (L/h)

ダンプトラック到着までの待機時間 5% を含めると作業能率は 1.26 ha/h, 待機時間を除くと 1.32 ha/h であった (表 5)。B 圃場は変形圃場であったため、枕地から反対側の枕地へ移動することがあり、移動時間の割合が大きかった。加えて、B 圃場では A 圃場に比べ排出作業に手間取り、待機時間を除いた作業能率は 1.20 ha/h であった。

子実収穫時の収穫工程の燃料消費量は A 圃場で 42.2 L/h, B 圃場で 41.0 L/h であり、その差は小さかった (表 6)。B 圃場の移動時の 1 時間当たりの燃料消費量が多いのは、移動中のエンジン回転数が高かったためである。各圃場の面積当たりの燃料消費量は A 圃場で 22.6 L/ha, B 圃場で 23.6 L/ha と両者の差は小さかった。作業内容のなかで最も燃料消費量が多い収穫作業時間の割合が B 圃場の 44% に対し A 圃場が 54% と著しく大きいため (表 5)、時間当たりの燃料消費量は B 圃場に比べて A 圃場が 3.2 L/h 大きく、28.4 L/h であった。収穫所要エネルギーは軽油発熱量を 35.77 MJ/L (戒能 2014) として算出すると A 圃場で 0.81 GJ/ha であった。

図3 10月21日乾燥試験時の子実水分と熱風温度の変化

2) 米麦用乾燥機によるトウモロコシ子実の乾燥
乾燥試験は10月21～22日にA圃場の収穫物を、11月6～7日にB圃場の収穫物を使って行った。10月21日からの乾燥試験では子実水分 25.1% の原料 9,700 kg を供試し、平均外気温 7.6℃・湿度 74% の環境で乾燥中の熱風温度は最高 43.3℃ で 50℃ には達せず (図 3)、14.5% までの乾燥に 18 時間を要した (表 7)。一般に米麦の乾燥機は

表7 トウモロコシ子実乾燥試験結果

乾燥開始日	10月21日	11月6日
投入量 (kg)	9,700	9,660
排出量 (kg)	8,480	8,715
子実水分開始時 (%)	25.1	22.6
終了時 (%)	14.5	14.3
正味乾燥時間 (h)	18.0	14.9
外気温度 (℃)	7.6	10.5
外気湿度 (%)	74	68
熱風温度 (℃)	34.7	38.5
穀温 (℃)	27.4	32.1
風量比 ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{t}$)	0.3	0.3
乾減率 (%/h)	0.6	0.6
容積重 (g/L)	705 → 768	711 → 768
消費電力量 (kWh)	—	56.1
燃料消費量 (m^3)	—	0.144
消費エネルギー (MJ)	—	5137
水 1 kg 除去消費 エネルギー (MJ/kg)	—	5.436

収穫時期の外気温に対応して乾燥機バーナの能力を設定しており、米麦の収穫時期より外気温が低かったため熱風温度の設定値には達せず、平均熱風温度 34.7℃で、最高穀温は 36.4℃であった。平均乾減率は 0.6% /h であった。

11月6日からの乾燥試験は平均外気温 10.5℃、湿度 68% の状況で、1回目と同じく熱風温度を 50℃ に設定した。9,660 kg の原料を 14.9 時間で子実水分 22.6% から 14.3% に乾燥した (図 4)。乾燥初期の風量比は $0.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{t}$ 、熱風温度の最高値は 42.1℃、平均は 38.5℃で穀温の最高値は 34.8℃であった。この時期としては平年よりも夜間の気温が高く、湿度が低かったため、夜間の乾燥速度の低下が小さく、平均乾減率は 10月21日と同じく 0.6%/h であった。

水 1 kg 除去消費エネルギーは 11月6日に計測した消費電力量と燃料消費量、灯油の発熱量 34.27 MJ/L (戒能 2014) から計算すると 5.436 MJ/kg であった。

3) 収穫乾燥作業日数の推定

(1) 収穫乾燥の作業工程シミュレーション

通常、米麦の乾燥施設への運搬はダンプトラッ

図4 11月6日乾燥試験時の子実水分と熱風温度の変化

表8 作業工程シミュレーションおよび所要エネルギー推定時の設定条件

収量	(t/ha)	9.94
乾燥機容量	(m^3 /台)	14.4
乾燥機投入量	(容積%)	97
子実投入時間	(h/台)	1.0
子実排出時間	(h/台)	2.0
子実トウモロコシ乾減率	(%/h)	0.6
収穫機燃料消費量	(L/ha)	22.6
収穫所要エネルギー	(GJ/ha)	0.81

クにバラ積み運搬して行われる。したがって、ここではバラ積み運搬を行った A 圃場の値を採用し、収穫機の作業能率を 1.3 ha/h に設定した。

乾燥機は 80 石用を 3 台使用し、乾燥機 1 台の投入時間は 1 時間、排出時間は 2 時間、乾減率は 0.6%/h とした (表 8)。A 圃場、B 圃場の平均収量 9.94 t/ha を乾燥前の子実水分 25% に換算した収量は 11.27 t/ha となる。乾燥機の最大投入量 10.1 t の 97% を投入した時の投入量は 0.9 ha 相当となり、収穫時間は作業能率 1.3 ha/h から 0.7 h となる。圃場区画等の作業条件による作業能率の変動を考慮し、乾燥機 1 台分の収穫時間をすべて 1 時間とした。T 生産法人が所有する圃場はすべて集積されていると仮定し、収穫機の移動時間は省いた。

T 生産法人が所有している 80 石乾燥機 3 台をトウモロコシの乾燥に利用した時の収穫乾燥作業

*「排出」は乾燥機1機毎に行う。

図5 T生産法人の収穫乾燥作業工程図

図6 収穫機を共同所有した時の収穫乾燥作業工程図

工程を図5に示した。乾燥以外の各工程の所要時間に収穫時の子実水分に対応した乾燥時間を加算した時のNo.1乾燥機の排出終了時刻は、乾燥開始時刻11時、収穫時のトウモロコシ子実水分を22~30%、トウモロコシの乾減率0.6%/h、仕上がり水分15%の条件に設定し式(1)から算出した。

$$H_1 = (11 + (M - 15) / 0.6 + 2) - 24 \quad (1)$$

ここで、

H_1 : 乾燥2日目乾燥機1台目の排出終了時刻

M : 収穫時トウモロコシ子実水分

子実水分が30%では乾燥時間に25時間を要し排出終了時刻は14時になる。子実水分が27.0%では乾燥時間は20時間で翌朝9時には排出が完了し、1日目と同じ収穫・乾燥サイクルが可能となる。ここでは同一日に乾燥機3台を稼働させることを前提条件にすると、収穫時の子実水分が27.0%以下では2日目の収穫が可能となるため、

表9 シミュレーションによる収穫機稼働日数

(作業可能日数/期間日数)

初期子実水分(%)	T生産法人(作業月-1工程日数(日))*					4戸農家(作業月-1工程日数(日))*				
	10月-2	10月-1	11月-2	11月-1	合計	10月-2	10月-1	11月-2	11月-1	合計
30.0	4/16		1/4	2/5	7/25	4/16			5/9	9/25
29.0	4/14	1/2		5/9	10/25	2/9	4/7		5/9	11/25
28.0	2/7	5/9		5/9	12/25	1/3	7/13		5/9	13/25
27.6							9/16		5/9	14/25
27.0	1/2	8/14		5/9	14/25		9/16		5/9	14/25
26.9		9/16		5/9	14/25					
26.0		9/16		5/9	14/25		9/16		5/9	14/25
25.0		9/16		5/9	14/25		9/16		5/9	14/25

* 各作業月における1回の収穫乾燥工程に要する日数

1工程日数は1日に、子実水分が27.0%を越える場合は乾燥機3台分の収穫が17時までに終わらないため2日になる。

収穫機の共同所有を想定し、戸々の農家所有の乾燥機を利用したときの収穫乾燥作業工程をシミュレーションした(図6)。80石の農家所有の乾燥機を使用し、圃場間の移動(準備も含む)に1時間を設定した条件では、全体で4台の乾燥機があれば、連続して収穫が可能である。また、T生産法人与異なり、乾燥終了後の排出工程2時間の中で収穫機が稼働できる。しかし、2日目の1台目の乾燥機への投入時間はT生産法人与同じ10時となるため、排出終了時刻は式(1)で計算した。

子実水分が30%では乾燥後の農家Aの排出終了時刻が翌日の14時、農家Dの排出終了時刻は20時になる。子実水分が27.6%以下になると、排出終了時刻が翌朝10時になるが、9時からの収穫開始、10時からの乾燥機への投入開始時刻に適合する。このことから4戸の農家(以下、4戸農家)の乾燥機を各1台利用した場合、子実水分27.6%以下では1工程日数が1日に、27.6%を越える水分では2日となる。

(2) 収穫機稼働可能日数の推定

試験対象地域の水田作農家では10月中旬まで米の仕上げ乾燥を行っているため、乾燥機が使用できる10月16日を収穫の早限と設定した。収穫試験圃場近隣の長沼町(中央農業試験場)の過去10年間の気象データの平均値から、11月10日で最高気温が10℃以下、最低気温が0℃以下になる。

そのような状況では、降雨後に土壌の乾燥が進まず地耐力の回復が見込めなくなるため、収穫の晩限は11月9日とした。「農業機械導入計画策定の手引き」(北海道農政部2009)では長沼町近隣の札幌市における作業可能日数率は10月が61%、11月が57%と示されている。

稼働可能日数の変動要因として、初期子実水分を30%~25%の範囲で変化させた。図2に2009年と2010年の圃場における子実水分の変化と各年の日付を独立変数とした直線回帰式を示した。圃場における子実水分低下率を各年の回帰係数の平均値-0.147%/日とした。この条件下で、初期子実水分を変えた時の収穫機稼働日数の推定法を以下に記す。

初めに1工程日数が2日から1日に変わるまでの期間とそれ以降の期間、さらに10月と11月に分けて4分割し(以後、最初からi区間、ii区間、iii区間、iv区間)それぞれの期間に10月の作業可能日数割合61%、11月の作業可能日数割合57%を乗じる。1工程日数1日の場合はその値を、1工程日数2日はその値の1/2を、いずれも小数点以下を切り捨てた値の合計を収穫機稼働日数とする。推定の結果、T生産法人では10月16日の子実水分が30%では収穫機稼働日数が7日、27.0%以下になると14日に、4戸農家では子実水分が30%では9日に、27.6%以下になると14日になった(表9)。

4) 収穫乾燥総所要エネルギーの推定

乾燥機1台あたりの投入量を算出するため、乾

図7 トウモロコシ子実の水分と容積重

乾燥試験中に得られた子実水分とトウモロコシの容積重の関係を図7に示す。加えて、収量調査、収穫試験、乾燥試験の結果および表8の値から乾燥機1台当たりの子実水分に対応した収穫乾燥所要エネルギーの計算方法を式(2)から式(8)に示す。

$$Bd = -5.5M + 837.7 \quad (2)$$

$$Ww = 14.4 \times 0.97 \times Bd \quad (3)$$

$$Wd = 14.4 \times 0.97 \times Bd \times (100 - (M - 15)) / 100 \quad (4)$$

$$S = Wd / 9940 \quad (5)$$

$$Ey = 0.81 \times S \quad (6)$$

$$Ed = (Ww - Wd) \times 5.436 / 1000 \quad (7)$$

$$T_M = Ey + Ed \quad (8)$$

ここで、

Bd : 容積重 (g/L)

Ww : 乾燥機1台当たりの原料投入量 (kg)

Wd : 乾燥機1台当たりの子実投入量 (子実水分15%換算, kg)

S : 乾燥機1台当たりの子実投入量換算面積 (ha)

Ey : 乾燥機1台当たり収穫所要エネルギー (GJ)

Ed : 乾燥機1台当たりの乾燥所要エネルギー (GJ)

T_M : 子実水分 $M\%$ 時の乾燥機1台あたりの収穫乾燥所要エネルギー (GJ)

T_M 値の計算結果からT生産法人は乾燥機3台分、4戸農家は4台分の1工程の収穫乾燥所要エネルギーと子実水分の関係を図8に示す。

収穫日の子実水分は圃場における子実水分低下率を用いて推定式(9)から求めた。

$$M = Mi - 0.147X \quad (9)$$

図8の回帰式に式(9)を代入して得られた10

図8 収穫子実水分と1工程あたりの収穫乾燥所要エネルギー

月16日からの経過日数における1工程の収穫乾燥所要エネルギーを式(10)(T生産法人)と式(11)(4戸農家)に示す。

$$Ys = 1.42(Mi - 0.147X) - 17.42 \quad (10)$$

$$Yf = 1.89(Mi - 0.147X) - 23.23 \quad (11)$$

ここで、

Mi : トウモロコシの初期水分 (%)

X : 10月16日からの経過日数 (日)

Ys : T生産法人の収穫乾燥所要エネルギー (GJ/工程)

Yf : 4戸農家の収穫乾燥所要エネルギー (GJ/工程)

これらの式で得られた1工程毎の収穫乾燥所要エネルギーを収穫機稼働日数計算時の4分割した収穫区間毎に総じて加え、それぞれの期間内の収穫可能日数割合を乗じて収穫乾燥総所要エネルギーを算出した(式(12), (13))。同様に収穫区間毎の収穫可能量は、式(4)に式(2)と式(9)を代入して求めた1日毎の収穫可能量を稼働日数計算時の4分割した収穫区間毎に総じて加え、それぞれの期間内の収穫可能日数割合を乗じて算出した(式(14))。

$$Es = (\sum_{x=p}^q 1.42 (Mi - 0.147X) - 17.42) \times c/d \quad (12)$$

$$Ef = (\sum_{x=p}^q 1.89 (Mi - 0.147X) - 23.23) \times c/d \quad (13)$$

$$Y = ((\sum_{x=p}^q 14.4 \times 0.97 \times (-5.5 (Mi - 0.147X) + 837.7) \times ((100 - Mi + 0.147X + 15) / 100))) \times c/d / 1000 \quad (14)$$

図9 初期子実水分と収穫乾燥総所要エネルギー

図10 初期子実水分と収穫乾燥総所要エネルギーの関係

ただし、

[i 区間 $p:0, q:a$] [ii 区間 $p:a+1, q:15$]

[iii 区間 $p:16, q:b$] [iv 区間 $p:b+1, q:24$]

ここで、

E_s : T生産法人の4分割期間 (i ~ iv区間) 毎の収穫乾燥所要エネルギー (GJ)

E_f : 4戸農家の4分割期間 (i ~ iv区間) 毎の収穫乾燥所要エネルギー (GJ)

Y : 乾燥機1台分の4分割期間 (i ~ iv区間) 毎の収穫可能量 (t)

a : 10月の収穫乾燥単位が2日の最終日にあたる日の10月16日からの経過日数

b : 11月の収穫乾燥単位が2日の最終日にあたる日の10月16日からの経過日数

c : 表8に記した4分割期間内の収穫機稼働日数 (日)

d : 表8に記した4分割期間内日数 (日)

トウモロコシの初期子実水分と収穫乾燥総所要エネルギーの関係を図9に示す。T生産法人の収穫期間内の総乾燥子実収穫可能量は式(14)から算出した4分割期間の Y の合計値を3倍し、4戸農家の場合は4倍した値とした。初期子実水分と総乾燥子実収穫可能量あたりの収穫乾燥総所要エネルギーの関係を図10に、初期子実水分と総乾燥子実収穫可能量の関係を図11に示す。収穫乾燥総所要エネルギーに占める乾燥エネルギーの割合が大きいため、初期子実水分に対する総乾燥子実収穫可能量あたりの収穫乾燥総所要エネルギーの関性に相関関係が認められ、図中の近似式は収穫機1台を条件とした時、現有乾燥機台数に関わらず収穫乾燥総所要エネルギーの推定に利用でき

図11 初期子実水分と総乾燥子実収穫可能量の関係

る。実際には子実水分が低下すると容積重が増加し、乾燥機投入量が増加し収穫可能量が増えるため(図11)、収穫乾燥総所要エネルギーは増加するが(図9)、T生産法人、4戸農家とも1工程日数が2日から1日に変わる日付以降、子実水分ではT生産法人で27.0%、4戸農家で27.6%以下になると低下傾向に転じる。

4. 考察

一般に穀物収穫機導入時の経済試算には収穫機の作業能率と1シーズンの収穫可能時間から計算される負担面積を使うが、本報では乾燥機台数や乾燥時間の制約条件を加味した年間稼働可能面

積を求めた。図 11 は収穫時期、収穫機台数、乾燥機台数を限定したシミュレーション条件で初期子実水分が下がることで総乾燥子実収穫可能量が増加し、1 工程日数が 2 日から 1 日に変わる子実水分以下では漸増傾向に変化することを示している。このことから、本報における収穫機の年間稼働可能面積は 1 工程日数が 2 日から 1 日に変わる初期子実水分における総乾燥子実収穫可能量を下限値として設定し、収穫試験を行った 2 圃場の平均収量から算出すると、T 生産法人では 37 ha、4 戸農家では 49 ha となる。

乾燥時間を短縮し、1 工程日数が 2 日から 1 日に変わる子実水分を上げることができれば、収穫機の年間稼働可能面積を増加できる。現有する乾燥機を使って収穫直後の乾燥時間を短縮する方法として稲・麦と同様に 2 段乾燥を行えば、単粒水分の平準化ができ乾燥効率が上がるとともに、1 段目の乾燥時間が短縮できる。しかし、本研究を行った圃場近隣の長沼町の 11 月中旬の平均気温 3.4℃、平年最低気温は -0.7℃であることから仕上げ乾燥の時期が遅れると外気温が低下し、乾燥効率の低下が予想される。このような理由から 2 段乾燥を選択せず、1 回の乾燥で目標水分まで乾燥させる必要がある。

中津らは収穫適期の子実水分の上限値を 30% (70℃, 7 日間乾燥法) として、品種の早晚性と収量、子実水分の推移に及ぼす影響を検討した結果、晩性品種ほど多収傾向にあるが 10 月中旬以降の子実水分の低下傾向が緩慢なることを指摘している (中津ら 2015)。子実用トウモロコシ導入時には当該地域における気象条件と品種毎の成熟度を考慮したうえで品種選定をするとともに目標とする初期子実水分を設定し、本報で行った作業シミュレーション手法を用いて効率的な生産体制を構築する必要がある。

以上、トウモロコシ栽培において収穫機台数と乾燥機台数を限定した条件のもとでは、収穫開始日の子実水分が収穫乾燥総所要エネルギーに影響を及ぼすことが明らかとなった。営農組織を対象とした機械作業シミュレーションについての報告は多く (田口ら 1989, 宮坂ら 1997)、これらの研究の背景は営農上機械費の占める割合が多かったことが考えられる。本報では新たな機械導入経費を抑えたうえ、コスト低減策のひとつとして収穫乾燥総所要エネルギーの推定例を示すことで、ト

ウモロコシ導入計画策定の参考に供したい。

引用文献

- 我妻幸雄・阿部篤郎・長田 進・西田初生 (1969): コーンピッカによるトウモロコシの収穫作業法, 北海道農業試験場彙報 95; 75-81.
- 北海道農業試験場 (1972a): とうもろこしのピッカーシェラによる収穫技術, 昭和 47 年度試験研究成績書 (機械化栽培関係); 31-36.
- 北海道農業試験場 (1972b): 大型施設による乾燥調製技術の確立, 昭和 47 年度試験研究成績書 (機械化栽培関係); 94-99.
- 北海道農業試験場 (1973a): とうもろこしのピッカーシェラによる収穫技術, 昭和 48 年度試験研究成績書 (機械化栽培関係); 39-42.
- 北海道農業試験場 (1973b): 大型施設による脱粒とうもろこしの常温通風試験, 昭和 48 年度試験研究成績書 (機械化栽培関係); 32-36.
- 北海道農業試験場 (1976a): とうもろこしのピッカーシェラによる収穫技術, 昭和 51 年度試験研究成績書 (機械化栽培関係); 95-98.
- 北海道農業試験場 (1976b): 大型施設による豆類・穀類の乾燥調製技術の確立, 昭和 51 年度試験研究成績書 (機械化栽培関係); 36-79.
- 北海道農政部 (2009): 農業機械導入計画策定の手引き, 社団法人北海道農業改良普及協会; pp.43-44.
- 戒能一成 (2014): エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数の改定案について, RIETI デイスカッションペーパー 14-J-047; pp.35-36.
- 宮坂寿郎・笈田 昭・山崎 稔・小倉 訓 (1997): 大区画圃場営農組合における機械化体系評価シミュレーション, 農作業研究 32(2); 95-105.
- 中津智史・濱村美由紀・中本 洋・甲田裕幸, 飯田憲司・相馬 潤 (2015): 道央地域における子実用とうもろこしの栽培法, 北農 82(2); 11-20.
- 田口義広・米山誠一・山田孝次 (1989): 営農組織を対象とした効率的機械利用のための作業体系シミュレータの適用, 農作業研究 24(3); 213-218.

Abstract

The energy required for harvesting and drying of shelled corn was estimated using the potential workable number of days for a grain-maize combine harvester predicated on the drying rate and the rate of harvesting in the paddy field areas. A harvester with an attached maize header and far-infrared radiation grain dryer for 14.4 m³ of shelled corn drying were used. The results of the simulation show that the moisture content of the shelled corn alters the duration of the process from 2 days to 1 day with 3 driers owned by a corporate farm versus 4 driers owned by 4 family farms. From the relationship

between the moisture content at the start of the harvest of the corn and the total energy consumption, the energy required in the harvesting and drying processes increase when the moisture content of the shelled corn decreases below 30% . However, it was found that the energy required in the harvesting and drying processes decrease when the period of the process changes from 2 days to 1 day.

Key Words

combine harvester, energy required to harvest and dry, far-infrared radiation grain dryer, farm work simulation