

赤外線ガス分析計による粃・小麦の呼吸特性の測定*

河野俊夫**・中野浩平**・喜田環樹**

村田 敏**・内野敏剛**・井上眞一**

要 旨

温度273.15~313.15(K), 含水率19~35(% d. b.) の範囲において, 粃と小麦の種子から発生するCO₂ ガス濃度を, 1 ppm まで読み取ることのできる赤外線ガス分析計を使って測定した。測定したCO₂ ガス濃度は理想気体として, 単位時間, 単位乾物重量当たりのCO₂mg 数に換算した。その結果, 両穀物の呼吸速度は多くの研究者が報告しているように温度に対しては指数関数的に増加することが確認され, また, 粃については含水率に対しても指数関数的に増加するが, 小麦の呼吸特性の増加傾向は, 低含水率での指数的傾向から高含水率の直線, あるいはS字の増加傾向へと変化することが明らかとなった。呼吸速度を記述する実験式を提案し, そのパラメータを最小二乗法による当てはめによって得た。提案した式は穀物の呼吸速度が穀温に対してアレニウス型の増加傾向を持つこと, および粃と小麦とで含水率に対する傾向の違いを考慮している。

〔キーワード〕 穀物, 呼吸, 粃, 小麦, 赤外線ガス分析計

Measurement of Respiration Characteristics of Rough Rice and
Wheat with Infrared Gas Analyzer*

Toshio KAWANO**, Kohei NAKANO**, Tamaki KIDA**,

Satoshi MURATA**, Toshitaka UCHINO**, Shin-ichi INOUE**

Abstract

The concentration characteristics of CO₂ gas generated from rough rice and wheat seeds, under various temperature and moisture conditions ranging from 273.15 to 313.15(K) and from 19 to 35(% d. b.) respectively, were measured with the infrared gas analyzer which is capable of reading 1 ppm of CO₂ gas concentration. The measured CO₂ gas concentration was supposed as ideal gas and transformed into the value of CO₂ mg per unit time and dry matter weight. The results of the transformation revealed that the respiratory rate of both grains exponentially increased with grain temperature, as reported by many investigators. The respiratory rate of rough rice also increased exponentially with moisture content, but the increasing inclination of respiration characteristics of wheat changes from exponential shape at low moisture content to straight or S-shape at high moisture content. An empirical equation describing the respiratory rate was proposed and its parameters were obtained by fitting with least square method. The proposed

* 1994年4月 第93回農業機械学会年次大会(九州大学)にて一部講演

** 九州大学農学部 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1, ☎092-641-1101) Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka, 812-81 Japan

equation takes into consideration that the respiratory rate of grains indicates Arrhenius type of increasing inclination with seed temperature and differs in the inclination with moisture content between both grains.

[Keywords] cereal grains, respiration, rough rice, wheat, infrared gas analyzer

I 緒 言

小麦の収穫は日本ではちょうど梅雨の時期と重なることもあって、収穫時の含水率は他の穀物に比べると一般に高くなる。このため、共同乾燥施設へ運ばれる小麦は、荷受けの待機中に温暖で比較的高い温度と高含水率とによって、活発な呼吸活動を行い、いわゆる呼吸熱を発生させて自身の温度を高め、時に腐敗に至ることもある。一方、籾の場合は、収穫期こそ湿度の比較的低くなる10月であるにしても、その収穫量は1994年現在で1,196万トンで、小麦の約21倍であり、必然的に乾燥施設においても容量を越えた籾は水分の高いままで貯留され、長期貯留中の呼吸熱あるいは穀物間空隙中のCO₂濃度上昇の影響は無視できないものと思われる。

呼吸熱を知ることは小麦や籾を貯留あるいは貯蔵する際の穀層内の蓄熱状況を推定し、ひいては品質劣化を抑制する方法をも見いだすことになる。しかしながら、穀物の呼吸熱の直接測定では、穀物の含水率が呼吸とともに変化する上、呼吸のために常に大気に触れていなければならない。しかるに通気による呼吸熱の直接測定は、測定に比較的時間を要し、その間、含水率の変化を伴うため、特定の含水率での呼吸熱測定というものは現在でも非常に困難である。したがって、ここでは間接的方法ながら、穀物の呼吸量を高精度の赤外線ガス分析計で精密に瞬時値として測定し、呼吸熱推定のための基礎資料とした。この結果は、直接的には貯蔵中の穀物間空隙中の酸素濃度の低下による層中の穀物の呼吸障害を知る基礎ともなる。

II 測定方法

測定に用いた小麦と籾の品種、収穫日、収穫場所を表1に示す。穀物は収穫後、直射日光を避けた室内に広げて15%, w. b. 程度まで乾燥させた後、庫内温度5°Cにセットした貯蔵庫に入れて、実験開始までの品質保持を行った。また、図1は

表1 供試材料

Table 1 Materials

穀物	品種	収穫日	収穫地
籾	ヒノヒカリ	平成6年10月14日	福岡県粕屋郡粕屋町
小麦	西風	平成5年6月5日	福岡県粕屋郡須恵町

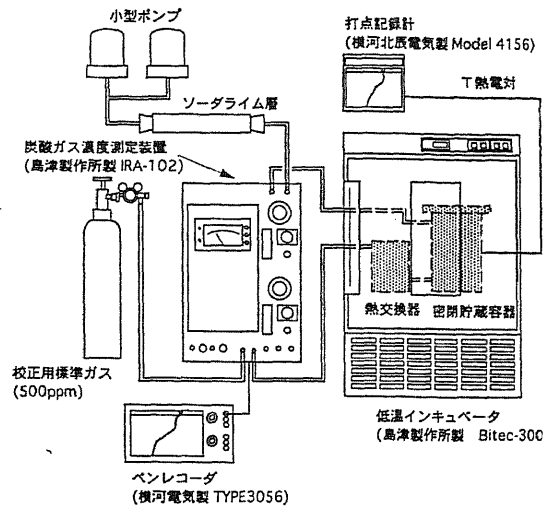


図1 測定装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus

呼吸測定装置の概略である。

穀物層へ送る空気には、人の呼吸による高濃度CO₂ガスの影響の少ない外気を導入し、2台の小型ポンプによりソーダライム層を通過させてCO₂ガスを除去した後、CO₂ガス濃度測定装置(島津製作所 IRA102)の基準側セルへと送り込まれる。基準側セルを通過した空気は、低温インキュベータ(島津製作所 Bitec-300)内の熱交換器を通してインキュベータにセットした温度とほぼ同じ温度に調整した後、供試穀物の入った塩化ビニール製円筒形密閉容器の下部から流入し、穀物層を通過して穀物の呼吸によって発生したCO₂ガスを含んだ状態で容器の上部から流出して、CO₂ガス濃度測定装置の測定側セルへと送り込まれる。

ソーダライム層は、内径27mm、長さ250mmの円筒容器に試薬1級のソーダライム(中粒)240gを入れ、気密を保つよう接合部分に蠟を塗

っている。ソーダライムは、使用しているうちにCO₂ガスの吸着能力が次第に低下するので、実験の際には、一つの含水率に対する測定を終えるごとに交換し、再充填した。

CO₂ガス濃度測定装置の校正は、次の方法で行った。すなわち、まず比較セル、測定セルにソーダライム層を通過させた同じ大気を導入し、ゼロ校正を行い、次に測定側セルに500ppmの工業用標準CO₂ガスを流してスパン校正を行った後、再び最初のソーダライム層を通過させた大気を導入して、CO₂ガス濃度測定装置の指示が0となることを確認することで行った。

CO₂ガス濃度測定装置には、フルスケール500ppmと1000ppmの測定モードがあり、500ppmモードは、基準側濃度との濃度差を検出するモードで、測定精度は0.5ppm、1000ppmモードは測定側へ流入したCO₂ガスの濃度を単独で濃度測定するもので、測定精度は1ppmである²⁾。通常の測定では、発生するCO₂ガスの濃度は500ppm以下となる(流量0.5L/minで)が、高温・高含水率の呼吸測定条件では、極端に呼吸量が多く500ppm以上となる場合のみ、1000ppmスパンの測定とした。

図2は円筒形密閉容器の詳細である。容器は塩化ビニール製で内径100mm、高さ170mmの円筒形である。容器本体と蓋の部分はネジを切り、さらに本体側に真空用Oリング、蓋にシリコンゴムシートを取り付けて気密が図られている。本体内部の底部、空気の流入口の上方には、直径1mmの通風孔を5mm間隔であけた仕切板がある。また、穀物層の中心温度を測るため線径0.3mmのT熱電対を挿入した。この密閉容器の気密性は、空気流入口に水銀マンオメータを取り付けて流出口より真空ポンプで0.5atmまで減圧させ、容器内の圧力の時間的変化を計測することによって確認した。その結果、2時間程度の間に圧力の変化は見られないことから十分気密は保たれているものと考えられた。

測定は、一回の供試量を500gとし、4種の含水率に対して各々農度を0°Cから40°Cまで5°C間隔で変化させて行った。設定した温度に穀温が達するまでに数時間を要するが、この間、小型ポンプによる空気の圧送は行わなかった。これは、数

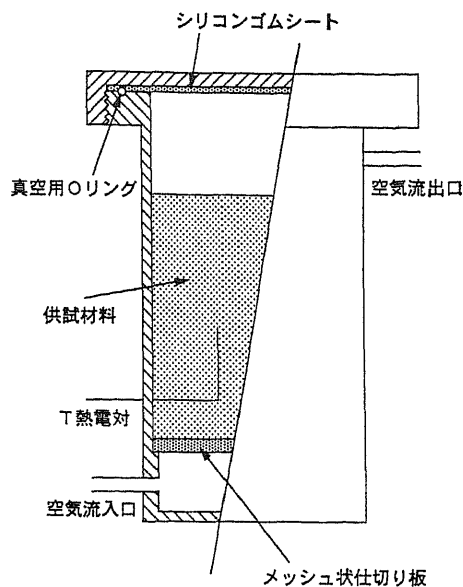


図2 密閉貯蔵容器

Fig. 2 Hermetic storage vessel

時間に及ぶ穀温調整中の通気により、穀物が乾燥されて密閉容器内の穀物の含水率が変化するのを防ぐためである。供試量を500gとしたのは、予備実験において、どの程度の呼吸量があるのかを検討した際に、その量が多い場合、濃度測定装置の測定範囲である1000ppmを越える場合があったため、高温・高含水率の実験条件においても、測定が可能となるような分量としたことによる。実験に供する籾と小麦の水分調整は、あらかじめ10g粒-135°C-24時間-0.008kg/kg' 常圧定温乾燥法により含水率を求め、調整目標含水率にするのに必要な蒸留水を加えることによって行った。その際、ヘッドスペースのない容器に充填して冷蔵庫に入れ、水分の平均化を図った。

なお、小麦については通常、休眠の打破が必要であるが、置床試験によって休眠がすでに打破されていることを確認した。すなわち、シャーレに蒸留水を含ませた濾紙を敷き、100粒の小麦をその上に置床し、20°Cに温度調節したインキュベータに入れ、7日間以内に発芽した粒を計数することで行ったが、ほぼ100%の発芽力が認められた。

III 測定結果および考察

小麦の呼吸速度を測定した例としては、中山³⁾

の著書の中に Clausen (1890) および Bailey (1918) の報告があり、彼らは小麦の呼吸速度の温度との関係および含水率との関係について述べている。それによれば、小麦の呼吸速度の含水率との関係については、含まれている水分の状態に関連するとされ、低含水率では含有水分の大部分が結合水であり、自由水がある程度貯えられるに至って始めて呼吸と平衡的傾向を生ずるとし、小麦の呼吸速度が 15%, w. b. で急上昇する理由をこのように結論づけている。

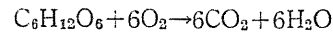
一方、呼吸速度と温度との関係については25°Cから指数関数的に上昇し、55°C以上では逆に下降する傾向を示したとある。高い温度で呼吸速度が下降する傾向は、品種こそ違うものの、本研究で供試した国産の小麦についても、予備実験において、その傾向が見られた。これは高温によって、胚芽部がダメージを受けるためであるが、こうした高温障害を受けた穀物の呼吸特性は、植物生理にかかわることであるし、また實際上、そのような高温障害粒の呼吸特性を測定する必要性もないので、本研究では呼吸特性の測定温度範囲を上限40°Cまでとした。

籾については、菊池と内藤⁴⁾が流気法によって玄米の呼吸量を、水分 13.5~18.1%, w. b., 温度 10~30°Cの範囲において測定している。また、近年では後藤⁵⁾らがガルバニ電池式の酸素濃度計によって、密閉容器内での籾の酸素消費速度という形で呼吸速度を推算しており、さらに疋田ら⁶⁾は籾の呼吸量と含水率との関係を詳細に測定している。いずれの報告も、同じサンプルで温度と含水率の両方について、広範囲に亘り測定されていないため、呼吸速度の実験式の当てはめにおいて、温度または含水率のいずれかのパラメータ決定の際に誤差が大きくなるものと思われる。

1. 呼吸速度と化学反応式

植物体の呼吸は化学的にみれば、呼吸の化学反応式における反応速度とみることができるので、呼吸の化学反応式を求めることによって、反応熱として呼吸熱を推定できるものと考えられる。呼吸は嫌気呼吸を除けば、呼吸基質の酸化という形で表現されるわけであるから、呼吸によって酸素を消費し、二酸化炭素と水を発生させることになるが、呼吸に使われる基質によって化学反応式が

異なっている。また、これらは呼吸によって植物体に取り込まれた酸素の体積に対する排出二酸化炭素の体積比、いわゆる呼吸商 RQ (Respiratory Quotient) によって分類されている⁷⁾。青果物の場合は、村田らのコメント⁸⁾にあるように呼吸基質としてクエン酸なども係わってくるが、籾の成分は食品成分表によれば、水分 15.5%, w. b. の場合、タンパク質7.4%, 脂肪3.0%, 糖質71.8%, 繊維1.0%が主成分であり、また、小麦の場合は、水分 13.5%, w. b. で同様にタンパク質10.5%, 脂肪3.0%, 糖質69.3%, 繊維2.1%が主成分となっている⁹⁾ので、呼吸基質は糖質のみと考えるべく¹⁰⁾、本研究のように十分な酸素環境のもとでの種実の呼吸は、ほぼ RQ=1 の場合であると思われる。これは、化学的には次式で表現される。



これはグルコースの完全燃焼であるが、その標準燃焼熱 ΔH_{298}° は、発生する水の状態によって異なり、Hess の法則より計算すると、

水が蒸気の場合、

$$\begin{aligned} \Delta H_{298}^\circ (g) &= \{6 \times (-393.5) + 6 \times (-241.8)\} \\ &\quad - \{-1274 + 6 \times 0\} \\ &= -2537.8 \text{ [kJ/mol]} \end{aligned}$$

水が液体の場合、

$$\begin{aligned} \Delta H_{298}^\circ (l) &= \{6 \times (-393.5) + 6 \times (-285.8)\} \\ &\quad - \{-1274 + 6 \times 0\} \\ &= -2801.8 \text{ [kJ/mol]} \end{aligned}$$

となる¹¹⁾ので、排出二酸化炭素 1 mol 当たりには換算すると、それぞれ 422.97 [kJ/mol], 466.97 [kJ/mol] の呼吸熱となる。ここで計算した呼吸熱は latm, 25°C の標準状態における値であり、温度が異なる場合には、Kirchhoff の法則により、生成系と反応系の比熱差を考慮して積分計算を行えばよい。したがって、二酸化炭素の発生速度を測定することでどの程度の呼吸熱を単位時間当たり生成するのかを推定できる。

こうして発生した呼吸熱は、もちろん穀物自身の温度を高める顕熱ともなるが、一方で水分を発生させているわけであるから、水分保持容量の小さい穀物層間隙空気への物質伝達抵抗分の水分、すなわち発生した水分のうち、物質伝達されない水分が穀物自身の水分を増し加えていることになり、一般に含水率の高い穀物ほど呼吸も活発であ

るので、呼吸熱はさらに増加すると考えられる。しかし、収穫された穀物は穀物粒子ごとに含水率が異なるわけで、含水率の高い穀物から含水率の低い穀物へと水分の移動があるため、水分分布を持つ貯留穀物層では、水分の移動・吸着による熱の輸送があり、実質的にどのくらいの穀温増加となるかはシミュレーションによる計算を行わなければ、明らかにできない。

さて、測定によって得られるデータは流量 QL/min 中に含まれる CO_2 濃度 $\times \text{ppm}$ であるので、単位時間当たり発生する CO_2 体積 V リットルは

$$V = 60Q \times x \times 10^{-6} \quad (1)$$

であり、発生する CO_2 ガスを理想気体とすれば、単位時間当たり発生する CO_2 のグラム数 i は、

$$i = \frac{pmV}{GT} \quad (2)$$

ここに、

i : 単位時間に発生する CO_2 質量 (gCO_2/h)

P : 気体圧力 ($= 1 \text{ atm}$)

G : 気体定数 ($= 0.082 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} \cdot \text{K}$)

T : 気体温度 (K)

m : CO_2 の分子量 ($= 44$)

供試穀物の質量を W 、湿量基準含水率を M' とすれば、乾物 kg 当たりで計算した単位時間に発生する CO_2 の mg 数は、

$$R = \frac{i}{W \left(1 - \frac{M'}{100}\right)} = \frac{60pmQx \times 10^{-3}}{GTW \left(1 - \frac{M'}{100}\right)} \quad (3)$$

ここに、

R : 単位時間に発生する CO_2 mg 数

($\text{mgCO}_2/\text{h} \cdot \text{kg Dry Matter}$)

W : 供試穀物量 (kg)

となり、この R を本研究では呼吸速度として、算出した。

2. 呼吸速度と穀温の関係

前節で述べたように、穀物の呼吸も化学反応の一種と考えられることから、呼吸速度は、この化学反応速度とみられる。したがって、呼吸速度と穀温との関係は、化学反応速度の温度依存性を示す Arrhenius 型の式で表されると考えられる。Arrhenius 式自身は実験的に得られたものであるが、最近の研究によれば、理論的にも、化学反応速度の温度依存性を示す式として正しいことが立証されている¹²⁾。

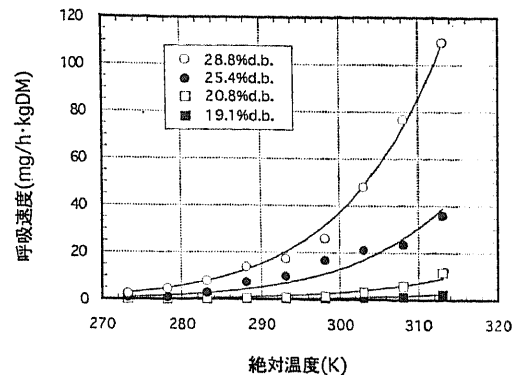


図3 籾の呼吸速度と穀温の関係

Fig. 3 Relationships between respiratory rate and seed temperature for rough rice

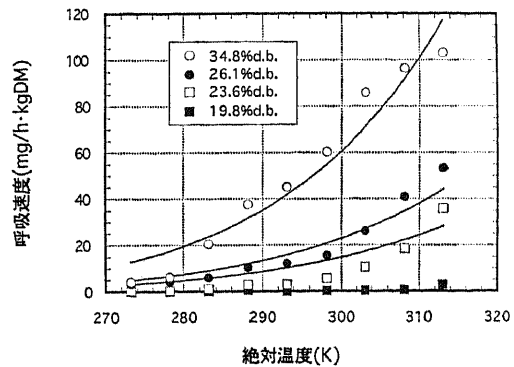


図4 小麦の呼吸速度と穀温の関係

Fig. 4 Relationships between respiratory rate and seed temperature for wheat

図3は籾の呼吸速度と穀温との関係を示したものである。実線は後節で提案する呼吸速度の実験式の結果である。含水率 25.4%, d. b. つまり湿量基準で 20.3% までは比較的緩やかな呼吸速度の上昇傾向を示すが、28.8%, d. b. になると 25°C あたりから急激に増加しているのが分かる。籾については、上昇の傾向は確かに穀温に対して指数関数的増加傾向とみることができる。

一方、図4は小麦の呼吸速度と穀温との関係を示したものであるが、含水率 34.8%, d. b. のデータ以外は、籾と同様に指数関数的に上昇している。

呼吸速度と穀温との関係をさらに詳しく検討するため、呼吸速度と穀温について Arrhenius プロットをしたものが図5である。実線は、データ

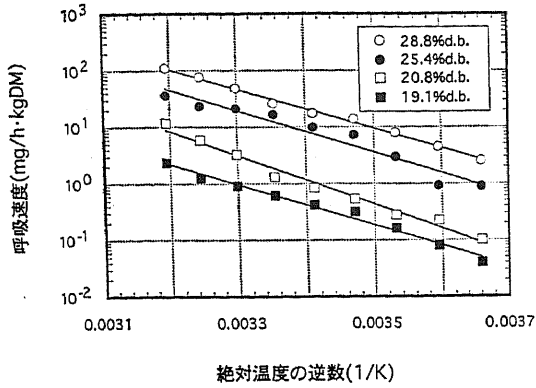


図5 アレニウスプロット(籾)

Fig. 5 Arrhenius type plots for rough rice

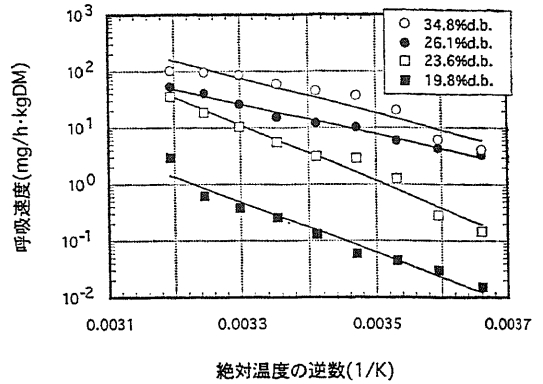


図6 アレニウスプロット(小麦)

Fig. 6 Arrhenius type plots for wheat

を Arrhenius 型の次式に当てはめた結果である。

$$R = q \cdot \exp\left[-\frac{s}{T_s}\right] \quad (4)$$

ここに、

R : 呼吸速度 (mgCO₂/h · kg Dry Matter)

q : パラメータ (mgCO₂/h · kg Dry Matter)

s : パラメータ (K)

T_s : 穀物温度 (K)

測定値は、この Arrhenius 式によって計算した直線にきわめてよく一致し、呼吸速度の温度依存性を、化学反応速度の温度依存式である Arrhenius 型とみることの正しさが実証された。

また、含水率にかかわらず傾きがほぼ一致している点が特徴的である。

一方、図6は小麦の場合の Arrhenius プロットを示したものである。籾と同様に小麦の呼吸速度においても、穀温と Arrhenius 型の関係が成り立っている。

最小二乗法で Arrhenius 式に当てはめた結果、得られた式(4)のパラメータとその95%信頼限界、および測定値との標準偏差を表2に示す。パラメータ q の95%信頼限界がパラメータ自身の数値よりも大きな値となっているが、これは式(4)の両辺の対数をとってパラメータについて線形化して回帰分析を行い、求められた $\ln q$ の95%信頼限界

表2 アレニウス式のパラメータ(籾と小麦)

Table 2 Parameters in equ. (4) for rough rice and wheat

穀物	含水率 (% d. b.)	q (mgCO ₂ /h·kgDM)	q の95%信頼限界 (mgCO ₂ /h·kgDM)	s (K)	s の95%信頼限界 (K)	R の標準偏差 (mgCO ₂ /h·kgDM)
籾	19.1	5.4083 × 10 ¹¹	+8.2437 × 10 ¹³ -5.3730 × 10 ¹¹	8199.8	+1498.1 -1498.1	0.10507
	20.8	3.2008 × 10 ¹⁴	+9.1888 × 10 ¹⁷ -3.1897 × 10 ¹⁴	9761.6	+1670.6 -1670.6	0.88481
	25.4	2.2864 × 10 ¹³	+9.6948 × 10 ¹⁶ -2.2859 × 10 ¹³	8421.5	+2463.9 -2463.9	5.0375
	28.8	1.0858 × 10 ¹³	+4.9338 × 10 ¹³ -8.8994 × 10 ¹²	7931.2	+500.6 -500.6	2.3743
小麦	19.8	2.1092 × 10 ¹⁴	+1.4848 × 10 ²⁷ -2.1092 × 10 ¹⁴	10214	+8960.6 -8960.6	0.68621
	23.6	1.7526 × 10 ¹⁸	+2.7484 × 10 ²⁰ -1.7515 × 10 ¹⁷	11297	+2170.6 -2170.6	1.1531
	26.1	1.1145 × 10 ¹⁰	+7.7474 × 10 ¹⁰ -9.7434 × 10 ⁹	6020.6	+606.0 -606.0	2.2638
	34.8	4.3063 × 10 ⁹	+1.8044 × 10 ¹⁴ -4.3062 × 10 ⁹	4732.6	+3110.9 -3110.9	8.9794

から計算したものであり、Arrhenius 式上の適合性に問題はない。

籾と異なり、小麦の場合は含水率によって直線の傾きが異なっている。すなわち、式(4)における見かけの活性化エネルギーが含水率 23.6~26.1%, d. b. を境に、それ以上の含水率でやや低下している。この傾向に再現性があるかどうかを確かめるために、実験を複数回行ったが、やはり同じ傾向を示した。この理由についてはさらなる解析が必要である。

従来、青果物の呼吸特性の温度依存式として次の GORE の式⁷⁾ が利用され、

$$R = R_0 \cdot 10^{ht} \quad (5)$$

ここに、

R : 呼吸速度 (mgCO₂/h · kg)

R₀ : 温度 0°C における呼吸速度
(mgCO₂/h · kg)

h : パラメータ (1/°C)

t : 青果物の温度 (°C)

青果物の温度が10°C上昇することによって呼吸量が何倍になるかを示す温度係数 Q₁₀ というものを 10°C 間隔で求めていたが、呼吸速度の温度依存性を、上記の Arrhenius 式で整理すれば、必要に応じて任意の10°C範囲における温度係数 Q₁₀ を求めることはきわめて容易である。

3. 呼吸速度と含水率の関係

中山⁸⁾によれば、呼吸速度と含水率の関係は、種実中に含まれる水の形態と関連があり、種実の浸水直後と浸水後数日間貯えられたものとは、呼吸速度に著しい違いを生ずるとしており、例えば、水分 15.2%, w. b. の小麦種実の場合、浸水後55日間貯えられたものの呼吸速度は、同一水分で浸水直後のものに比較して4倍となり、また、水分 15.7%, w. b. で浸水後 108 日間貯えられたものは、同じく同一水分で浸水直後のものの約8倍の呼吸速度を示したという。その理由として、水分を保持している時間が十分であるとそれだけグルコースの形成に有利であり、グルコースは時の経過につれて蓄積する傾向があるためとしている。したがって、吸水させて水分の調整を行った本研究のような場合では、呼吸速度と含水率との関係を測定するに当たって、穀物に水分を吸収させてどの程度の時間が経過しているかに留意し、

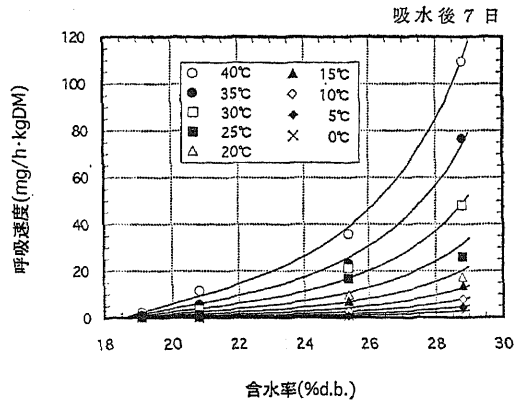


図7 籾の呼吸速度と含水率の関係

Fig. 7 Relationships between respiratory rate and moisture content for rough rice

測定された呼吸速度の結果には吸水後の時間を明記する必要があると思われたので、籾と小麦の実験結果の図に吸水後の日数を併記した。

図7は籾の呼吸速度と含水率の関係を示したものである。実線は後述する呼吸速度の実験式の結果である。籾の呼吸速度は、これまでも報告があるように含水率に対して指数的上昇傾向を示している。指数関数的の上昇傾向が著しくなるのは、穀温 30°C 以上で、30°C 以下では呼吸速度は小さく、含水率 28.8%, d. b. のものでも 25°C で 25mg CO₂/h · kg Dry Matter (以下DMと略記する)程度で、この数値は発生する呼吸熱に換算すると、2.4kJ/h · kgDM 程度となる。しかし、30°C 以上では、含水率 25.4%, d. b. 以上で急激に呼吸速度が上昇し、含水率 28.8%, 穀温 40°C では最高値 110mgCO₂/h · kgDM に達している。これは同様に呼吸熱に換算すると、10.6kJ/h · kgDM となる。

図8は小麦の呼吸速度と含水率との関係である。穀温 10~30°C では、指数関数的に増加する傾向を示すが、穀温 30°C 以上では、籾の傾向とは少し異なって、含水率 23.5~26.1%, d. b. のあたりに急激な上昇が見られ、指数関数的増加傾向よりもむしろ直線的あるいはS字型に増加傾向を示している。また、穀温 10°C 以下では呼吸速度の増加はほとんどなく、高含水率の 35% d. b. であっても 5mgCO₂/h · kgDM 以下である。小麦の収穫時含水率は 24% w. b. から時に 30% w. b. となる

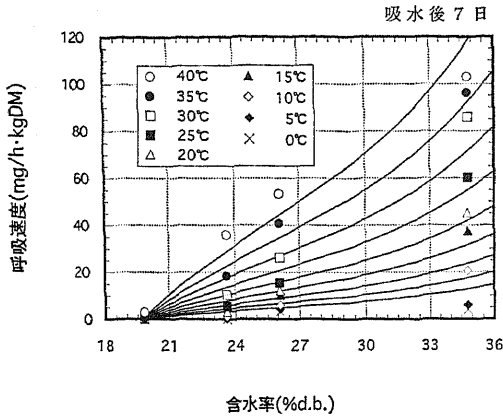


図8 小麦の呼吸速度と含水率の関係
Fig. 8 Relationship between respiratory rate and moisture content for wheat

ことを考えると、特にこの含水率範囲での呼吸量の増加傾向を知ることは重要であり、収穫時は20°C以下に穀温を保持することが穀物の呼吸熱の発生を抑制することにつながるものと思われる。

図7、図8はいずれも、吸水に7日間かけて水分調整した穀物の呼吸速度の測定結果である。上述したように、中山の報告³⁾には、吸水後の日数によって、呼吸速度に違いのあることが述べられているが、その日数は55日と108日間と比較的長く、その呼吸速度の測定結果の中には、発芽等による成長過程の呼吸増加が多分に含まれていると考えられ、本研究での7日間の水分調整期間中には発芽は認められず(小麦の置床試験時の発芽は極端な高水分環境にあることによる)、収穫直後の穀物に較べて吸水後数日を経た穀物の呼吸速度に違いがあることは認められるとしても、その違いは小さいものと思われる。吸水後の日数により呼吸速度の変化する過程は、穀物の発芽と密接な関わりがあり、作物学的に重要であるが、この点については今後の検討課題である。

また、呼吸速度は品種によっても特性が若干異なることが疋田ら⁶⁾の報告で明らかになっているが、その差はわずかであるので、ここで得られた結果は、その他の品種についてもわずかな誤差で適用できるものと考えられる。

4. 呼吸速度の実験式

さて、上記のように穀物の呼吸速度が温度に対しては Arrhenius 式にしたがうこと、そして、

含水率に対しては粗と小麦とで傾向が異なることを考慮して、本研究では次式を提案する。

$$R = (a + bM + cM^2) \exp \left[-\frac{d + eM + fM^2}{T_s} \right] \quad (6)$$

ここに、

M: 含水率 (% d. b.)

R: 呼吸速度 (mgCO₂/h · kg Dry Matter)

T_s: 穀物温度 (K)

a, b, c: パラメータ (mgCO₂/h · kg Dry Matter)

d, e, f: パラメータ (K)

前述したように、呼吸速度の温度依存関係については、理論的に裏付けられているが、含水率に対しては現在までのところ、理論的な説明がないため、この式は将来的に拡張が容易なように、温度依存関係については Arrhenius 式の形をとり、また、含水率については、他の穀物などで異なった傾向を示す場合にも拡張可能なように、多項式の形をとっている。

従来、含水率との関係を指数関数的として、これを一つのパラメータで表す実験式も示されているが、本研究で得られた結果では、小麦の呼吸速度が穀温30°C以上になると含水率に対して直線的あるいはS字のような上昇傾向を示し、精度良くあてはめることはできない。式(6)はパラメータの数こそ多くなるものの、実験式においては適用範囲全般における精度が要求されるため、このように定式化することが適当と思われる。

データを式(6)に基づいて非線形の最小二乗法である Deming 法で当てはめた結果を図3、図4、図7、図8に実線で示す。得られたパラメータと標準偏差を表3に示す。いずれの穀物においても

表3 実験式のパラメータ(粗と小麦)

Table 3 Parameters in equ. (6) for rough rice and wheat

パラメータ	粗	小麦
a (mgCO ₂ /h·kgDM)	-2.7201×10 ¹²	-1.2462×10 ⁸
b (mgCO ₂ /h·kgDM)	-1.3351×10 ¹¹	-6.2757×10 ⁶
c (mgCO ₂ /h·kgDM)	1.5133×10 ⁹	6.3891×10 ⁶
d (K)	5.7051×10 ⁸	3.5109×10 ¹³
e (K)	2.0777×10 ²	7.7205×10 ¹
f (K)	-4.7601	-1.2099
Rの標準偏差 (mgCO ₂ /h·kgDM)	3.3685×10 ⁻¹	9.6763×10 ⁻¹

呼吸速度の温度との関係および含水率との関係についてよく一致しており、特に籾においては標準偏差も小さく呼吸速度の実験式として高い信頼性がある。

式(6)は、パラメータに対して非線形の形をしているので、式(4)のように両辺の対数をとるなどして線形化し、これを回帰分析するようなことはできず、また、残差の平方和を線形の場合のように不偏推定量とみなすわけにはいかない。したがって、得られたパラメータの信頼限界を求めるためにF統計量は利用できないため、表3には、得られたパラメータの適用による実測値との標準偏差のみを示した。

式(6)で算出される呼吸速度の単位は $\text{mgCO}_2/\text{h} \cdot \text{kgDM}$ であるから、発生すると推定される呼吸熱Hは、発生水分の状態を蒸気とすると、

$$H = \frac{JR}{m} \quad (7)$$

ここに、

H：呼吸熱 ($\text{kJ}/\text{h} \cdot \text{kgDM}$)

m： CO_2 の分子量 (-)

J：排出 CO_2 ガス 1 mol 当たりのグルコース完全燃焼熱 ($=422.97\text{kJ}/\text{mol}$)

で求められる。

IV 結 論

小麦や籾を貯留あるいは貯蔵する際に発生する呼吸熱を推定する間接法として、また、その際の穀物間隙中での酸素濃度低下による層中の穀物の呼吸障害を知る基礎として呼吸速度を測定した。具体的には、穀物から排出される CO_2 ガス濃度を、読み取り精度 1 ppm の赤外線ガス分析計によって種々の穀温、含水率の条件下で測定し、呼吸速度を穀物に含まれる単位乾物重量、単位時間あたりの CO_2 mg 数として算出した。呼吸速度の穀温、含水率との関係をプロットした結果、籾については穀温、含水率のどちらに対しても呼吸速

度は指数関数的に上昇する傾向を示したが、小麦の場合は含水率に対しては籾とやや傾向が異なり、高含水率になるにしたがって、指数関数的上昇傾向から直線またはS字状の上昇傾向に変化することが分かった。また、呼吸速度と穀温の Arrhenius プロットを行ったところ、測定値は Arrhenius 式にきわめてよく一致したことから、呼吸速度を化学反応速度と見ることの正しさを確認できた。

このような呼吸速度の Arrhenius 型温度依存性と含水率に対する籾と小麦の傾向の違いを考慮して、本研究では6つのパラメータをもつ実験式を提案し、非線形の最小二乗法によって籾と小麦に対するパラメータを算出した。得られた実験式による計算値と実験値を比較検討したところ、温度、含水率の広い範囲に亘って良い一致をみた。

参 考 文 献

- 1) 新農林社：1996年度版農業機械年鑑，40—45，1995
 - 2) 島津製作所編：赤外線ガス分析計 (URA—106) 取扱説明書，4—6，27—30
 - 3) 中山 包：農林種子の発芽，内田老鶴園新社，92—95，1996
 - 4) 菊池三千雄，内藤 広：玄米の呼吸量に関する研究 (第1報)，食総研報告，16，68—71，1962
 - 5) 後藤清和，三輪精博，山田勝義：穀粒の呼吸特性に関する研究 (第1報)，農機誌，55(3)，51—57，1993
 - 6) 疋田慶夫，垂井不二夫，安部武美：加熱による籾の呼吸量と発芽率の変化，第50回農機学会年次大会講演要旨，321—322，1991
 - 7) 緒方邦安：青果保蔵汎論，建白社，36—37，52—53，1980
 - 8) 村田 敏，宮内樹代史，王 延耀：生鮮農産物の呼吸量の測定，農機誌，55(2)，69—75，1993
 - 9) 医歯薬出版：日本食品成分表 (第1版)，1983
 - 10) W. スタイルズ，E. C. コッキング (倉石 晉，西成典子訳)：植物生理学入門，東京大学出版会，101—140，1972
 - 11) 日本化学会編：化学便覧 (改訂第3版) 基礎編II，丸善，305—315，1984
 - 12) 村田 敏：農産物貯蔵の基本原則，最終講義テキスト，1—11，1996
- (原稿受理平成8年3月6日・質問期限平成9年1月31日)