農学における熱物性研究

大下誠一

三重大学生物資源学部

〒514 津市上浜町 1515

穀物を例にとって、農産物の熱物性値が必要とされる理由に触れた。穀物の熱物性値を取り扱った報告は多くある。しかし、これらは管理技術に供するデータとしては有用であるが、穀物の熱物性値を体系的に把握するには至っていないという状況にある。この点に関して、例を上げて説明を試みた。

1. はじめに

書き出しに当たって後悔している。原稿をお引き受けするときに悟るべきであったが、編集委員会から与えられた題目が大きすぎることに、いまさらながら気付いたという始末である。さりとて投げ出すわけにもいかない。それならば筆者の研究分野を土俵として語るしかない。うまくすれば、熱物性を専門とする方々が、この拙文によって農産物の取扱いに少しでも理解を深めて下さるという可能性もある。というわけで、農学の一分野において熱物性がどのように関わってくるのかを述べて、熱物性研究の現状に触れてみることにする。筆者の立場から、農産加工に視点が限られるという難点には目をつぶって戴くようお願いしたい。

2. 農産物と熱物性値

食用にされる農産物というと、野菜や果実とともにコメや麦が思い浮かぶ。これらのうち、野菜や果実には、選別や包装という工程を除けば、収穫されたものがそのまま食卓にのぼるものも多い。一方、コメや麦のような穀物は、粉碎、混合、分離、選別、乾燥、加熱、冷却等、多くの調製・加工工程を経た後に私たちの口に達する。このとき、食品としての品質を損なわずに加工することが要求される。農産物が食品であることが、加工操作の制限要因となっている点がいくつかある。形、色、艶等の外観、風味がそれである。このほか、乾燥を例に取れば、特に熱に関係する制限要因が考えられる。例えば、米粉の乾燥では、熱風をあてて乾燥する。熱風の温度が高く、乾燥速度が早すぎると玄米の内部に水分の大きな濃度勾配が生じて”胴割

れ”が増加する。”胴割れ”とは籾殻の中の玄米に生じる割れのことである。これが生じるとその後の工程で玄米が砕けてしまい、商品価値を失ってしまう。また、米粉の温度が60℃を越えると発芽率が激減する[1]。籾は収穫後も生きている生物材料であるが、生物としての機能を失ってしまうことになる。熱風温度を高くして乾燥効率を上げることと品質の保持が対立することになる。経験的に乾燥条件を定めたものが乾燥技術であるとすれば、技術では最適な操作条件を見いだすことができない。この問題を解決するためには工学的なアプローチが必要となる。すなわち、米粉の乾燥機構を知って入出力の関係をモデル化し、シミュレーションを行って最適操作条件を見いだすという手順になる。このような工学的手法を試みるとき、穀物の熱物性値を知ることが必要となる。

3. なぜ穀物か？

コメは日本人の主食として知られている。大半の人が毎日食しており、余りに身近であるが故に、なぜいまさらコメ（穀物）の加工を取り上げなければならないのかという疑問をお持ちであろう。そこで簡単に説明をさせて戴く。穀物とはイネ科植物の実を指し、コメ、麦類、トウモロコシ、コーリヤンなどが主なものである。コメに限ってみても、これを主食としているのは日本のみならず朝鮮半島、中国、東南アジア、インド亜大陸、さらにはアフリカの東側のマダガスカル島にいたる地域の人々まで含まれる。人類の約半数はコメを主食としているのである。これを広げて穀物とすれば、この世界で最も基礎的な食物として如何に重要な地位を占めているかお分かりであろう。

圃場において成熟した状態から消費されるまでの間の穀物の損失は、穀物の種類、品種、地域及び気候等によって異なるが、生産量の5～50%に達する[2]。これは、成熟してから収穫されるまでの圃場での損失や収穫時の損失などを含めた数字である。1990年にアジアの一国を訪れたとき、車で数時間の距離を移動することがあった。途中、舗装道路いっばいに藁を数10cmの高さに敷き詰めたところが何カ所もあった。藁を敷いたように見えたのは、実は、道路を走る車を利用して脱穀をしていたのである。どれだけの稲が損傷し失われてしまうだろうかと心配せずにいらなかった思いがある。この一事例だけでも、穀物が多量に損なわれていることを示すに十分である。わが国ではこの事例のような形での損失はないと思われる。しかし、おいしいコメしか食べないという消費者の嗜好はご存知の通りである。そのため、貯蔵により品質劣化がおこると、食料としては価値があっても商品価値が大幅に低下するという別種の問題が生じている。ベーシックなことから消費者の嗜好を考慮しなければならないことまで、解決すべき問題は、まだまだ多く存在しているといえる。

4. 穀物の熱伝導率

穀物の量の確保は、品質が保証されてこそ意味がある。そのために、穀物の乾燥および貯蔵技術を一層適切なレベルに移行させることが重要である。穀物の乾燥あるいは貯蔵の過程で現れる問題の多くは、熱移動および物質（おもに水）移動に関係している。そして大きな水分濃度勾配がある場合を除いて、物質移動は基本的に熱移動によって誘発される。したがって、穀物の熱特性を正確に把握しておくことが重要である。穀物の熱伝導率は、1935年に Bakke and Stiles [3] が貯蔵庫内の解析をするためにオート麦の熱伝導率を測定したのを初めとして、Table 1 に示すように多くの報告例がある。それぞれの文献に記載された具体的な数値については熱物性ハンドブック[19]を参照して戴くこととして、ここでは、これらの文献にほぼ共通する問題点について述べてみたい。

前述したように文献は多数見受けられるが、穀物内の熱移動およびそれに伴う物質移動を対象とした工学的アプローチに対する大きな障害は、熱物性値データ

が不足していることである。ここで言う不足とは公表されたデータの量を指すのではない。データに必要とされる情報が不足しているのである。農産加工の分野で穀物の熱伝導率というと、一般的には穀物充填層の有効熱伝導率を指す。それならば、穀物の温度や水分とともに空隙率をパラメータとした表現が必要である。しかし、過去の研究事例のほとんどは、穀物の熱伝導率を水分あるいは温度の関数として表したもので、か

Table 1 Reports on the thermal conductivity of grains

Rice	Wheat, Barley
Wratten[11] (1969)	Bakke[3] (1935)
Rough rice	Oats
Dua[12] (1969)	Oxley[4] (1944)
Brown rice, Hull	Wheat, Maize
White rice	Oats
Hosokawa[13] (1971)	Babbit[5] (1945)
Rough rice	Wheat
Yamada[14] (1972)	Moote[6] (1953)
Brown rice	Wheat
Seno[15] (1976)	Kazarian[7] (1965)
Rough rice, Milo	Wheat, Corn
Yellow dent corn	
Morita[16] (1979)	Chandra[8] (1971)
Rough rice	Wheat
Kameoka[17] (1984)	Chang[9] (1986)
Rough rice	Wheat, Corn
	Sorghum
Oshita[18] (1985)	Alagusundaram[10]
Rough rice	(1991)
Brown rice	Barley
	Lentil, Pea

さ密度あるいは空隙率については測定時の数値を付しただけに終わっている。限定された(測定対象とした)穀物であれば、かさ密度が一定の範囲にある限り、管理技術としての意味はある。しかし、穀物の熱伝導率を統一的に把握するには至っていない。結果はどうか。Fig.1 を見ていただきたい。これは Table 1 から粉の熱伝導率を抜粋して図示したものである。水分14.6 %の位置に縦線を入れてあるが、水分が一定の線上であっても、熱伝導率は大きな違いを呈している。測定時の温度は文献によって異なっているが、図にみられるほどの違いを来す要因とは考えられない。従来、これは粉の品種の違いであるとか測定法の違いであるという理由で片づけられてきた。しかし、いかに”有効”熱伝導率といっても、このようにバラツキを呈する表現のままでは物性値というのは抵抗がある。もう少し統一的な把握をするために、これらの整理を試みた。詳細は文献[20]を参照して戴くことにして、概略を述べる。粉粒子の熱伝導率を用いて、仮定した充填層内の熱移動モデルから粉の有効熱伝導率を表現するという常套手順を試してみようというわけである。

すなわち

$$\lambda_e = F(\lambda_f, \lambda_{\text{rice}}, \varepsilon, \phi) \quad (1)$$

という表現ができれば、見通しが良くなる。

ここで、モデルFには国井—スミスのモデルに充填粒子の有効接点数を導入した岡崎ら[21]のモデルを利用した。また、 λ_e は粉の有効熱伝導率、 λ_f は間隙流体の熱伝導率、 λ_{rice} は粉粒子の熱伝導率、 ε は空隙率、 ϕ は球形粒子の有効接点数を粉に適用するために筆者が加えた粉の形状係数(同体積の球の表面積を粉の表面積で除した値)である。さて計算には粉粒子の熱伝導率が必要となるが、これに関する報告は極めて少なく、コメについては玄米[14]と粉[17]に関して、それぞれ1例ずつあるのみである。そこで、筆者が得た有効熱伝導率を基にして、(1)式を満足するように粉粒子の熱伝導率を決めた。これ以後に記す値は水分14.6 %、温度26℃に限定する。求めた値は0.42 W/(mK)であり少々大きな値となった。ちなみに文献[17]によれば0.36 W/(mK)である。そこで λ_f をさまざまに変化させて文献値[17]と比較してみた。Fig.2 がその結果である。実線は(1)式による推算値であり、記号によるプロットは文献値である。間隙が水で満たされた場合を除いて、かなり良くフィットしている。したが

Fig.1 Representative values of effective thermal conductivity of rough rice

Fig.2 Predicted and literature data of dimensionless thermal conductivity

って、モデルFを用いる限り、先の粉粒子の熱伝導率を使って有効熱伝導率を表現できそうである。次に、Fig.1に示した文献値と比較してみた。そのためには、文献値を空隙率に対して整理しなければならない。ここで問題が生じる。先に、熱物性値に付随する情報が欠けていると指摘したが、モデルの計算に必要な空隙

率が記載されていない文献が多いのである。ただし、かさ密度の記載はある。そこで、筆者のデータを用いて、かさ密度と空隙率との関係を調べてみた。幸いなことに初のかさ密度と空隙率は、Fig.3 に示すように、水分に関係なく簡単な直線関係にあることが分かった。こうなれば、すべての文献値を空隙率に対してプロットすることができる。Fig.4 は Fig.1の水分14.6 %の

Fig.3 Relationship between void fraction and bulk density of rough rice

Fig.4 Effective thermal conductivity of rough rice

線上にある文献値を空隙率に対してプロットしたもので、実線が (1)式による有効熱伝導率の推算値を示している。図中の記号■は (1)式を適用して λ_{rice} を決定するために用いた実測値である。図に示した文献中、Wratten[11]、Seno[15]および Morita[16]らの値には、測定時の試料温度に関する記述がないため単純に比較することができないが、推算した実線からは少々外れている。しかし、他の文献値は推算値に近いところに位置している。水分の関数として並べる限り、説明がつかないほどのバラツキがあるように見えた有効熱伝導率が、パラメータを適切にとることによって見通しの良い形で整理された。

5. 穀物中の水の比熱

穀物の比熱については、熱伝導率の節で述べたような情報の欠如という問題はないように思われる。ここでは、少し別の視点から比熱について考えてみたい。穀物の比熱は水分の一次関数で表されるという報告が一般的である。ということは、比熱に対する水分の寄与が大きいことを意味する。したがって、穀物の構成成分の比熱を云々することは、とりあえずは必要なさそうである。つまり、穀物を水と絶乾穀物との2成分系と考えて良いことになる。そうすると、穀物の比熱を、絶乾穀物と水の比熱の重量割合に応じた和として表現できそうである。もちろん、ここでは比熱に加成性が成り立つものと考えている。そこで穀物中の水の比熱に関する報告を探してみた。これがなんと見当たらない。わずかに、穀物中の水の比熱は自由水より大きい[22,23,24]という指摘があるのみである。これは、水分の関数として表された穀物の比熱を、水分ゼロへ外挿しての推論にすぎない。穀物は多孔性の物質である。そこに吸着された水分は吸着熱を放出するので、そのエンタルピーは飽和水よりも低い状態にある。したがって先の指摘は定性的には正しいと思われるものの、外挿で得た値を用いるわけにはいかない。そこで、またしても筆者の例で申し訳ないが、穀物中の水の比熱[25]を求めることとなった。

ある温度において平衡含水率にある穀物を考えると、Othmerの式として知られる

$$\ln P_v = \frac{\Delta H_v}{\Delta H_s} \ln P_s + Z \quad (2)$$

が成り立つ。ここで、 ΔH_v および ΔH_s は、それぞ

れ、与えられた温度において平衡含水率にある穀物中の水および飽和水の蒸発熱、また、 P_v および P_s は平衡蒸気圧および飽和蒸気圧である。 $\Delta H_v / \Delta H_s$ および Z は、狭い温度範囲では含水比 m (乾量基準; 小数) のみに対応して定まると考えてよい。そこで、異なる温度における2本の平衡含水率曲線を実験によって定め、同一の含水比を与える P_v を決めれば、 P_s は蒸気表より求められるので、その含水比における係数 $\Delta H_v / \Delta H_s$ を求めることができる。このようにして (3) 式の関数 $f(m)$ が実験的に決定される。

$$f(m) = \frac{\Delta H_v}{\Delta H_s} \quad (3)$$

穀物中の水の蒸発熱は、同温度の飽和水の蒸発熱よりも微分吸着熱 H_{ads} だけ大きい。したがって

$$\begin{aligned} H_{ads} &= \Delta H_v - \Delta H_s \\ &= \{f(m) - 1\} \Delta H_s \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

さて、穀物中の水の平均のエンタルピー $H_{w, rice}$ は、飽和水のエンタルピー H_w から微分吸着熱 H_{ads} を減じたものと考えられるので、次式が成立する。

$$\begin{aligned} H_{w, rice} &= H_w - H_{ads} \\ &= H_w - \{f(m) - 1\} \Delta H_s \end{aligned} \quad (5)$$

比熱を平均のエンタルピーの温度微分であると定義すれば、穀物中の水の比熱 C_{pw} は

$$C_{pw} = \frac{\partial H_w}{\partial T} - \{f(m) - 1\} \frac{\partial \Delta H_s}{\partial T} \quad (6)$$

となる。ここで T は絶対温度である。上式の右辺第1項は飽和水の比熱、第2項は吸着熱放出による比熱の変動分を示している。いま、10 - 20 °C の範囲で飽和水の比熱を 4.19 kJ/(kg K) とする。また、飽和水の蒸発熱 ΔH_s kJ/kg を温度基準飽和蒸気表[26]から読みとって温度 θ °C に関して

$$\Delta H_s = 2500 - 2.37\theta \quad (7)$$

とすれば

$$C_{pw} = 4.19 + 2.37 \{f(m) - 1\} \quad (8)$$

となる。こうして、穀物中の水の比熱が求められる。粳に関して決定された関数 $f(m)$ を文献[17]から引用して (8) 式を Fig.5 に示した。データの性格上、含水比がゼロ付近では信頼性に欠けるが、これにより、粳中の水の比熱をある程度は定量的に理解することができる。また、絶乾粳の比熱を知って任意の含水比の粳の比熱を算定することができるようになった。

Fig.5 Estimated specific heat of water in rough rice

6. おわりに

熱物性の専門家からすれば当たり前といわれそうな事例を挙げた。しかし、穀物は水分を含んでいること、殻で覆われた不均一な構造体であること、さらには種類によって粒径や形状が異なることなど、これらの性状を一般化して表現するという意味では取扱いが難しい面がある。熱物性の把握が十分でない理由の一つはここにある。また、農産物には穀物以上に取り扱いにくいものも多くある。このため、とりあえずはその時点で必要とされるデータを得ようということになる。その結果、物性値を一般化できない形で提示するという状況が作られてきたものと思われる。農産物特有の性状に多少でも理解を得て、農産物の熱物性研究に関心を寄せて戴ければ幸いである。

参考文献

- [1] 細川明, 化学工学と農産物の加工, 化学工学協会第15回秋季大会シンポジウム講演要旨集, p.225-228 (1981).
- [2] D. B. Brooker et al., Drying cereal grains, Chap.1 and 4, (The AVI Publishing Company 1974).
- [3] A.L.Bakke and H.Stiles, Thermal conductivity

- of stored oats with different moisture content, *Plant Physiology*, 10, p.521 (1935).
- [4] T.A.Oxley, The properties of grain in bulk(III) *J. Soc. Chem. Ind.*, 63, p.53-55 (1944).
- [5] J.D. Babbit, The thermal properties of wheat in bulk, *Can. J. of Research*, vol.23, F, p.388-401 (1945).
- [6] I. Moote, The effect of moisture on the thermal properties of wheat, *Can. J. of Technol.*, 31, p.57-62 (1953).
- [7] E. A. Kazarian and C. W. Hall, Thermal properties of grain, *Trans. of the ASAE* 8(1), p.33-48 (1965).
- [8] S.Chandra and W.E.Muir, Thermal conductivity of spring wheat at low temperature, *Trans. of the ASAE*, 14(4), p.644-646 (1971).
- [9] C. S. Chang, Thermal conductivity of wheat, corn, and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content, *Trans. of the ASAE*, 29(5), p.1447-1450 (1986).
- [10] K. Alagusundaram et al., Thermal conductivity of bulk barley, lentils, and peas, *Trans. of the ASAE*, 34(4), p.1784-1788 (1991).
- [11] F.T. Wratten et al., Physical and thermal properties of rough rice, *Trans. of the ASAE*, 12(6), p.801-803 (1969).
- [12] K. K. Dua and T. P. Ojha, Measurement of thermal conductivity of paddy grains and its by-products, *J. agric. Engng. Res.*, 14(1), p.11-17 (1969).
- [13] 細川明, 増本浩士, 穀粒の熱伝導率, 農業機械学会誌, 32(4), p.302-305 (1971).
- [14] 山田豊一, 玄米の熱伝導度, 農芸化学会誌, 46(12), p.665-668 (1972).
- [15] 瀬能誠之他3名, 鋼製サイロによる穀物貯蔵に関する基礎的研究(II), 農業施設 6(1), p.10-18 (1976).
- [16] T. Morita and R. P. Singh, Physical and thermal properties of short-grain rough rice, *Trans. of the ASAE*, 22(3), p.630-636 (1979).
- [17] 亀岡孝治, 粳の乾燥に関する基礎的研究, 博士論文(東京大学) (1984).
- [18] 大下誠一, 穀物の熱特性に関する基礎的研究, 博士論文(東京大学) (1985).
- [19] 日本熱物性学会, 熱物性ハンドブック, p.440-442 (日本熱物性学会, 1991).
- [20] S. Oshita and K. Nakagawa, Estimation of effective thermal conductivity of rice in bulk, *Proceedings of the 6th International Drying symposium*, vol.1, p.77-84 (1988).
- [21] M. Okazaki et al., *AIChE Symposium Series*, No.163, vol.73, p.164-174 (1977).
- [22] P. M. Pfalzner, The specific heat of wheat, *Can. J. of Technol.*, 29, p.261-264 (1951).
- [23] R. W. Disney, The specific heat of some cereal grains, *Cereal Chemistry*, 31, p.229-334 (1954).
- [24] D.K. Sharma and T.L.Thompson, Specific heat and thermal conductivity of sorghum, *Trans. of the ASAE*, 16(1), p.114-117 (1973).
- [25] 大下誠一, 他2名, 粳および玄米の比熱とその推算, 農業機械学会誌, 54(2), p.67-74 (1992).

Studies on themal properties in the field of agricultural science

Sei-ichi OSHITA

Fac. of Bioresources, Mie University
Kamihama-cho 1515, Tsu 514

The necessity of thermal properties of grain, as an example of agricultural products, is described. The thermal properties of grain can be found in many reports, however they have not still been understood systematically. This present situation is explained through some illustrative literature data.

(Received May 17, 1993.)