

液体窒素による大豆の急速凍結*

村田 敏**・河野俊夫**・中野浩平**

要 旨

液体窒素による大豆の直接凍結を種々の含水率について行なった。凍結中の瞬間的な温度と気泡生成の観測から得られた結果と考察は次の通りであった。

- 1) 大豆粒子内を均一温度とし、Heissの式の凍結率に依存する温度を仮定して、熱収支の微分方程式を導出した。
- 2) 凍結中の大豆表面気泡の写真から、沸騰状態が核沸騰であることがわかり、熱収支式が求められた。この式をルンゲ・クッタ・ギル法で数値解析し、実測値にあてはめることによって大豆沸騰の熱伝達の特性値 α が決定された。

【キーワード】 大豆, 凍結, 液体窒素, 核沸騰熱伝達

Rapid Freezing of Soybeans by Liquid Nitrogen*

Satoshi MURATA**, Toshio KAWANO**, Kohei NAKANO**

Abstract

Direct freezing of soybeans by liquid nitrogen were tried at various moisture contents. The results obtained from the measurements of transient temperature and the observation of bubble generation during freezing were as follows :

- 1) An differential equation of heat balance was introduced assuming that temperature is uniform in a soybean grain and depends on the freezing ratio of Heiss formula. The equation was solved numerically by Runge-Kutta-Gill method and the obtained one agreed well with the observed one.
- 2) The photographs of bubbles on the soybean surfaces during freezing revealed that the boiling mode was a nucleate one. Consequently, an equation on heat balance was developed. Analyzing this equation by Runge-Kutta-Gill method and fitting the predicted curves to the observed values, the characteristic value of α on the heat transfer in nucleate boiling of soybeans was determined.

【Keywords】 soybean, freezing, liquid nitrogen, nucleate boiling, heat transfer

I 緒 言

沸騰は固体—液体または液体—液体間に温度差があり、低温側液体がその圧力での沸点以上に過

熱された結果生じる現象で、身近な例としては水の沸騰が挙げられる。この沸騰による熱伝達は、同じ圧力のもとでの沸点以下の熱伝達に比較して伝熱能力が飛躍的に向上する特徴を持つ。

そこで本研究では、凍結粉碎などの前処理として従来研究の進められてきた低温窒素ガスによる農産物の凍結の代わりに、液体窒素の蒸発時冷熱を伝熱効率の高い沸騰熱伝達を直接利用して Hydro-freezing を行なう方法について基礎的実験と

* 1992年4月 第51回農業機械学会年次大会(東京)にて一部講演, 1992年9月 第47回農業機械学会九州支部例会(熊本)にて一部講演

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

理論的解析を行なった。測定には脂質が多く凍結粉碎による粉末化が行なわれている大豆を供試材料として用いて、液体窒素による大豆の直接凍結中の温度変化の測定と表面沸騰状態の撮影を行ない、大豆の凍結シミュレーションに必要な物性値を計算したので、その結果を報告する。

なお、大豆の凍結粉碎は通常低水分で行なわれ、凍結による力学的特性の変化に関する研究などはこれまでも報告はある¹⁾。一方、満田²⁾、福里³⁾、松下⁴⁾の低温窒素ガスによる種々の農産物に対する凍結試験の結果によれば、高水分大豆の凍結曲線には鞍状の温度変化が表れており、このような水分増加に伴う特異な現象をも同時にシミュレーションでできれば、将来的に高水分状態での凍結を利用した新しい農産物加工方法の基礎資料となることから、今回は高水分大豆についても凍結試験を行なった。

II 実験方法

供試材料の大豆には、1991年11月9日に福岡県農業試験場で収穫したタマホマレ品種を使用した。

供試用の大豆は、できるだけ表面に傷がつかぬようにすることが望ましく、このためピンハーベスターなどを使わずに、圃場よりそのまま引抜いた状態で収穫し、実験に供するまでの間、庫内温度を約3°Cに設定した低温庫に保存した。

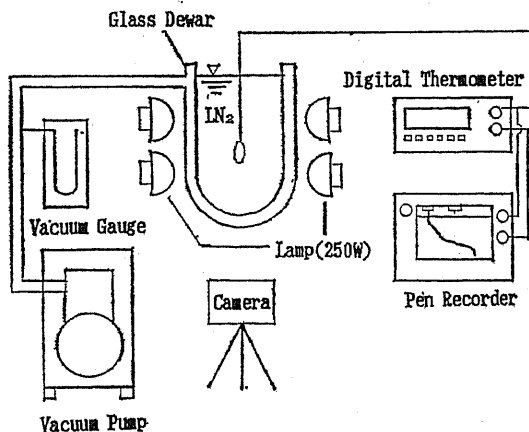


図1 実験装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

図1は実験装置の概略である。実験では、冷却・凍結中の大豆表面の状態を写真撮影するが、通常のデュワービンでは内部に鏡面処理を施しているため、内部の撮影は困難である。そこで今回の実験では、内部の鏡面処理を施していないガラス製デュワービン(円柱形：内径95mm、高さ190mm)を新たに作成し、真空ポンプで内部空隙圧力を下げる方法を採用した。

供試大豆の冷却・凍結中の温度変化を測定するために、中心に線径0.1mmのT熱電対を挿入する必要があるが、大豆は水分による体積変化が著しく、含水率の低い状態で熱電対を挿入して水分調整を行なうと、高水分では、熱電対挿入のために空けた穴と熱電対との間に空洞ができ、密着が悪くなる。また、含水率の低い状態から水分を加えて水分調整を行なえば、表面に大豆特有の皸や裂皮などの外部損傷を生じる。このため、供試大豆の水分調整と熱電対の挿入は、次の方法で行なった。すなわち、大豆約50粒を純水の入ったビーカーに入れて1日放置することによって飽和水分状態にし、きわめて軟質となった大豆粒子のへそ側の最長粒径方向からT熱電対を挿入し、少量の瞬間接着剤によって固定する。次に、この高水分大豆を冷蔵庫内で除湿乾燥し、1日おきに1サンプルの大豆を取り出して実験に供試することとした。ただし、熱電対の挿入深さは、調整目標水分によって異なる。これは、大豆の乾燥による水分調整の際、熱電対を固定するために塗布した接着剤のついた部分の大豆表面は、大豆の乾燥による水分調整の際、固定されたままのため、大豆のその他の部分の収縮によって熱電対の接点が挿入時よりも前方に進み、中心からかなりずれてしまうためである。水分調整は、上記のような方法で行なったため、加湿調整による方法に比べて正確に調整できないが、水分は12.1、19.3、28.4、39.4% (湿量基準)とした。

水分の測定方法は、大豆の場合、揮発性物質としての油成分を多く含むため、標準的な測定方法は決定しておらず、常圧定温乾燥法、カールフィッシャー法、トルエン蒸留法、赤外線乾燥法など種々の方法⁵⁾が提案されているが、今回はA.O.C.S.の測定方法⁶⁾を改良した堤らの方法である10g粒-130°C-4時間法により、供試大豆と共

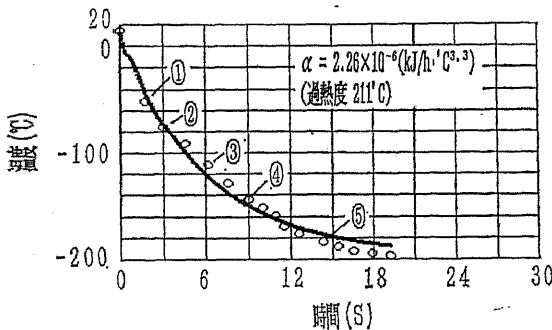
に水分測定用に入れた大豆の水分の定量を行ない、供試大豆の水分とした。これは供試大豆が単粒であり、10gに満たないこと、および液体窒素から引上げた際に大豆表面に霜がつくため、正確な水分測定が困難なためである。

実験は、ガラス製デューワービンの空隙圧力を油回転真空ポンプ（佐藤真空製 SV-2）で絶対圧力約 267Pa まで減じた後、液体窒素(沸点 -195.79°C , 101325Pa) 約 1 リットル程度を入れ、投入直後のデューワービン内面温度による液体窒素の沸騰が収斂し、デューワービン周辺大気放射伝熱による熱を受けてわずかな内面発泡が発生する程度となった時点で、大豆粒子周辺の液体窒素温度測定用の T 熱電対（線径 0.3mm）と共に大豆粒子をガラス棒の先端約 2 cm の位置に固定した状態で液体窒素中に投入し、冷却・凍結中の大豆中心温度と周辺液体窒素温度をペンレコーダー（National VP-6541A）で記録すると同時に、高感度モノクロームフィルム（ASA:1600）、50mm 接写レンズを使用してシャッタースピード 1/4000 秒（カメラ：ニコン FM2）で大豆表面に発生する沸騰気泡の撮影を行なった。

III 実験結果および考察

1. 粒子温度と表面沸騰状態

図 2 は、大豆（水分 12.1%）を液体窒素中へ投入した直後から、大豆粒子の温度が液体窒素の常圧



$T_{so} = 15.00(^{\circ}\text{C})$ $W = 3.0 \times 10^{-4}(\text{kg})$
 $T_L = -195.8(^{\circ}\text{C})$ $A = 4.00 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$
 $\Delta\theta = 0.2(\text{s})$ $m = 12.1(\% \text{ wet basis})$

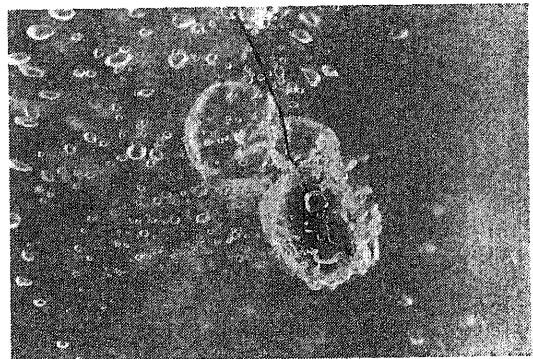
図 2 大豆の凍結シミュレーション（水分 12.1%）

Fig. 2 Freezing simulation for soybeans
 (at moisture content of 12.1%)

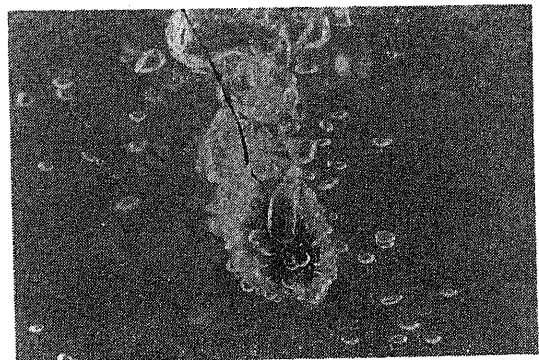
沸点である $-195.79^{\circ}\text{C}(77.36\text{K})$ に達し、表面沸騰が収斂するまでの温度変化を示したものである。測定値はペンレコーダーで記録しているの、連続した曲線になるが、この図では写真撮影を行なった時刻のデータのみをプロットした。実線は、後述する凍結シミュレーションによる計算値である。

また、図 3～図 5 は、撮影した写真の中から代表的な表面沸騰の状態を選びだしたものであり、図の括弧内の数字は図 2 の測定点に付した番号の位置の状態であることを示している。

図のように大豆投入初期 1.5 秒（中心温度 -69.5°C ）と 2.9 秒（ -85.1°C ）では、核沸騰によって発生した気泡が合体してきのこ状になっており、膜沸騰に近い状態であるが、発生気泡が大豆粒子全体を覆ってはいないため、基本的には核沸騰で



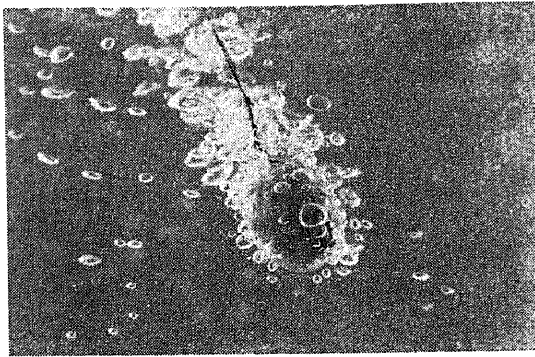
投入後 1.5 秒 ①
 中心温度 -69.5°C



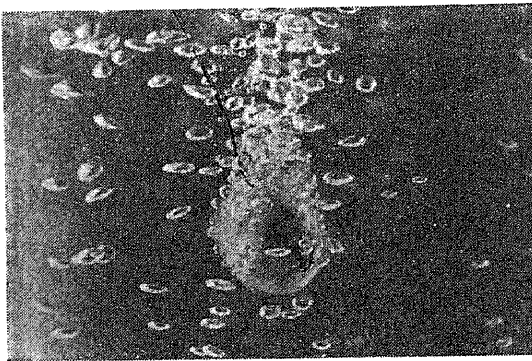
投入後 2.9 秒 ②
 中心温度 -85.1°C

図 3 大豆表面の沸騰状態

Fig. 3 Boiling state on the surface of soybean



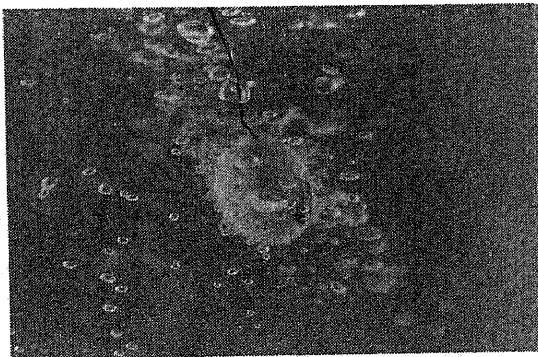
投入後 6.2秒 ③
中心温度 -125.3°C



投入後 8.6秒 ④
中心温度 -151.3°C

図4 大豆表面の沸騰状態

Fig. 4 Boiling state on the surface of soybean



投入後 14.1秒 ⑤
中心温度 -188.2°C

図5 大豆表面の沸騰状態

Fig. 5 Boiling state on the surface of soybean

あると考えられる。気泡の直径は、大豆の大きさから計算して0.6~1.0mm程度である。8.6秒後(-151.3°C)および6.2秒(-125.3°C)では、核沸騰の様子がはっきり表れてきている。また、発生気泡の上昇によって大豆上部の伝熱が遅れるため、気泡の発生前線は大豆下部から上部へと後退していくのが分かる。

2. 凍結率と粒子温度の関係

図6は、1種類の溶質が固体溶媒としての氷に溶けない場合の水溶液の一般的な温度と組成の関係を示した模式図であるが、例えば凍結前の農産物の状態がA点のような温度と水溶液組成の場合、農産物の冷却に伴って、AからBへと垂直に変化をし、B点で最初の氷が生成され、さらに農産物の温度が下がり、C点のような温度に達すると、氷がさらに生成されるが、溶質は氷には溶け込まれていないため、水溶液の濃度は、B点から液相線に沿ってD点のような濃度の濃い水溶液となる。この時、生成した氷と水溶液の割合は、この規則によって線分CD:CEのようになる。最後に、共晶点温度に達すると、水溶液中の溶質を含めて全体が凍結する⁷⁾。

大豆に限らず野菜や果実などおよそすべての農産物の含有水分中には、可溶成分が少なからず含まれているため、含有水分の凍結の進行に伴い、このような水溶液中の可溶成分濃度増加、いわゆ

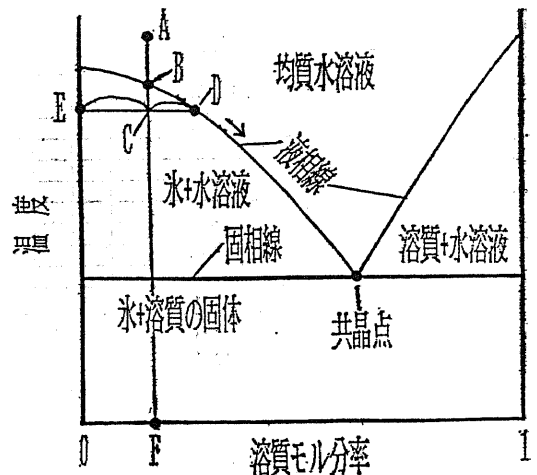


図6 1成分系の相変化模式図

Fig. 6 Scheme of phase changes for one component system

る濃縮による氷点降下を起こしているものと考えられる。

氷点降下に関する Raoult の法則から凍結率 X と食品の温度 T_s との関係が次のように導きだされている⁹⁾。

$$X = 1 - \frac{T_f}{T_s} \quad (1)$$

しかし、農産物中に含まれる可溶成分は1種類であることはまれであるので、この式では当てはまらないことが多い。村田¹⁰⁾は、流動層凍結理論の中で、上式に類似した次式を用いることにより、グリーンピースの流動層凍結について精密なシミュレーションに成功している。ただし、この式における氷結温度 T_f には、凍結率 X がゼロとなる点をとって補正した。

$$X = \gamma - \frac{\delta}{T_s} \quad (2)$$

そこで大豆の場合も、この式を適用することとしたが、大豆の凍結率 X と粒子温度 T_s との実測例がないため、加藤の文献⁹⁾に記載された Beans に関する Riedel の測定値を利用した。

図7は最小二乗法によるあてはめの結果であり、式(2)の γ 、 δ の値を次のように得た。

$$\gamma = 1.03(-), \quad \delta = -0.949(^{\circ}\text{C})$$

ただし、このデータは初期水分89% (湿量基準) の値であり、初期水分 m' の凍結率式 X' は次式で与えられる (補遺 I)。

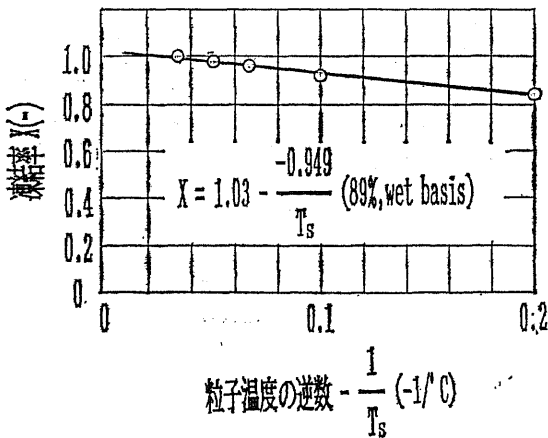


図7 凍結率と粒子温度の関係 (ビーンズ)

Fig. 7 Relationships between freezing ratio and particle temperature (for beans)

$$X' = \gamma' - \frac{\delta'}{T_s} \quad (3)$$

ここで、

$$\gamma' = 1 - \frac{m}{m'}(1 - \gamma) \quad (4)$$

$$\delta' = \frac{m}{m'} \delta \quad (5)$$

である。

3. 沸騰熱伝達式

写真撮影で明らかになったように、大豆の沸騰は核沸騰であり、温度変化をシミュレーションするためには、核沸騰熱伝達の式が必要となるが、核沸騰熱伝達現象の複雑さから研究者によって提唱されている機構がまちまちなため、種々の実験式が報告されている。今回は、その中から代表的な次の3つの核沸騰熱伝達式について、後述する大豆の凍結シミュレーションによって適用性を検討した。

Kutateladze の式¹¹⁾

$$\frac{q_s}{T_s - T_L} \cdot \frac{l}{\lambda_L} = 7.0 \times 10^{-4} \left(\frac{q_s l}{\nu_L L \rho_V} \right)^{0.7} \times Pr_L^{0.35} \times \left(\frac{p}{\{\varepsilon g(\rho_L - \rho_V)\}^{1/2}} \right)^{0.7} \quad (6)$$

西川と山本の式¹²⁾

$$\frac{q_s}{T_s - T_L} \cdot \frac{l}{\lambda_L} = 0.8 \left\{ \left(\frac{q_s l}{\nu_L L \rho_V} \right)^{1/3} \left(\frac{q_s}{B^2 C} \right)^{1/3} \right\} \times Pr_L^{1/3} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{2/3} \quad (7)$$

ただし、 B 、 C は定数で次の値をもつ。

$$B = 900(\text{l/m}), \quad C = 7.119(\text{kJ/h})$$

Labountzov の式¹³⁾

$$\frac{q_s l}{\nu_L L \rho_V} = D$$

として、

$D < 10^{-2}$ のとき

$$\frac{q_s}{T_s - T_L} \cdot \frac{l}{\lambda_L} = 0.0625 \left(\frac{q_s l}{\nu_L L \rho_V} \right)^{0.5} Pr_L^{1/3} \quad (8)$$

$D > 10^{-2}$ のとき

$$\frac{q_s}{T_s - T_L} \cdot \frac{l}{\lambda_L} = 0.125 \left(\frac{q_s l}{\nu_L L \rho_V} \right)^{0.65} \quad (9)$$

ただし、式(6)、(7)に表れる l は、次の式で定義される長さの次元をもつ量である。

$$l = \left(\frac{\varepsilon}{g(\rho_L - \rho_V)} \right)^{1/2}$$

また、式(8)、(9)の l は重力加速度 g を含まない代表長さである。したがって、3式を q_s について整理し、他の物理量を一定と考えると、熱流束 q_s と過熱度 $T_s - T_L$ の関係は、それぞれ次のようになる。

Kutateladze の式の場合

$$q_s \propto (T_s - T_L)^{1.0 \sim 3} = (T_s - T_L)^{3 \sim 3} \quad (10)$$

西川と山本の式の場合

$$q_s \propto (T_s - T_L)^3 \quad (11)$$

Labountzov の式の場合

$$q_s \propto (T_s - T_L)^2 \quad (D < 10^{-2})$$

$$q_s \propto (T_s - T_L)^{1.0 \sim 3.5} \quad (D > 10^{-2}) \quad (12)$$

4. 粒子冷却・凍結の方程式

前項から核沸騰熱伝達では、熱流束が過熱度の2.0~3.3乗前後に比例するので、乗数を n とおき、比例定数を α とし、かつ、大豆粒子の大きさが小さいことから、内部温度分布を無視して熱収支の式をたてると、次のようになる。

$$-\frac{\partial}{\partial \theta} (C_s W T_s) + \sigma W m \frac{\partial X}{\partial \theta} = \alpha (T_s - T_L)^n \quad (13)$$

左辺第1項は顕熱の変化、第2項は大豆内水分の凍結に伴って得られる凝固熱の変化を表している。

さて、粒子の比熱 C_s と水分 m 、凍結率 X の関係については、氷の比熱を C_1 、水の比熱を C_2 、氷と水以外の構成物質の比熱を C_3 とした次の Siebel の式

$$C_s = \{C_1 X + C_2(1 - X)\}m + C_3(1 - m)$$

$$= \{C_1 X + C_2(1 - X) - C_3\}m + C_3 \quad (14)$$

から、

$$C_s = (3.352 - 2.149X)m + 1.159 \quad (15)$$

となる。 C_3 は、大豆に含まれる水分以外の乾物の比熱と考えられ、比熱は一般に温度の関数であるが、村田¹⁴⁾が測定した DSC による穀物比熱の研究によれば穀物の比熱は一般に次式のようにセ氏温度に対して2次関数的関係にあり、低温ではある一定値に漸近する傾向を示す。

$$C_s = (aT_s^2 + bT_s + c)m + dT_s^2 + eT_s + f \quad (16)$$

$a \sim f$: パラメータ

この研究では、乾物に対する測定も行なわれており、 $T=0, M=0$ とすれば、大豆乾物の比熱 C_3

は

$$C_3 = f = 0.2767(\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.159(\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C})$$

となる。式(13)を展開し、式(3)と(15)を代入して整理すると、

$$\frac{\partial T_s}{\partial \theta} = -\frac{\alpha(T_s - T_L)^n}{W \left(C_s - \frac{\delta' m (2.149 T_s + \sigma)}{T_s^2} \right)} \quad (17)$$

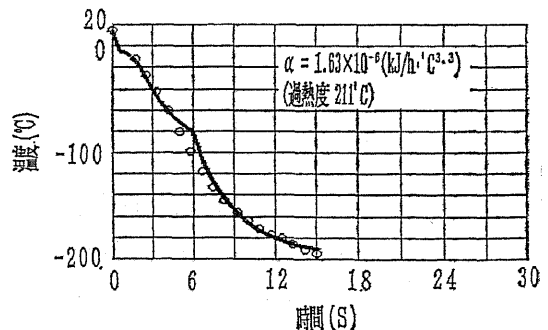
を得る。

5. 核沸騰時の熱伝達率と凍結シミュレーション

図2、8、9、10は、式(17)から Runge-Kutta-Gill 法によって行なった凍結シミュレーションの結果である。前述した核沸騰熱伝達に関する3つの式の適合性を比較するため、これらの図には各式によって計算したシミュレーション曲線を入れてあるが、計算値の曲線が1本に見えるのは、3式から各々計算した曲線はほとんど重なったためである。この図から明らかなように、3つの核沸騰熱伝達式は、ほとんど同じ適合性を示しており、計算値は、大豆粒子の凍結曲線の変曲した点の特徴もよくとらえている。

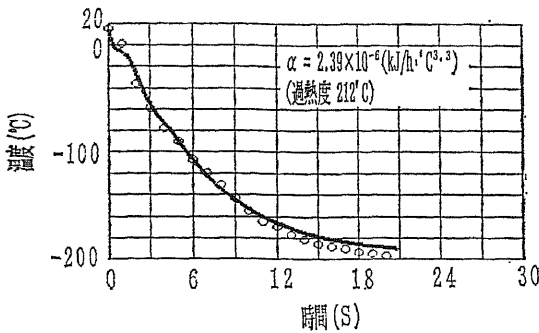
なお、大豆の表面積は大豆種子を、大豆種子の幼根と臍を通る断面の最長方向の長さを直径とする球とし、その表面積を計算に用いた。

このシミュレーションの結果、Kutateladze の式に対する比例定数 α が図中に示したように求められた。なお、シミュレーションによる α の最適値の推定は、測定値と計算値間の標準偏差を評



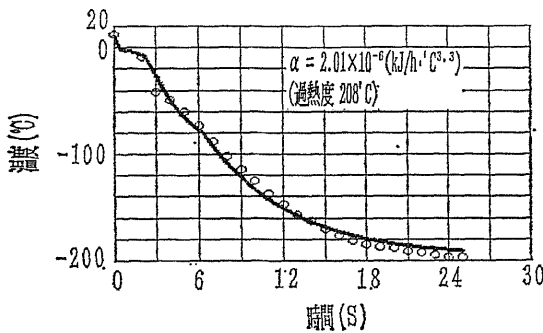
$T_{s0} = 15.00(^\circ\text{C})$ $W = 3.0 \times 10^{-4}(\text{kg})$
 $T_L = -195.8(^\circ\text{C})$ $A = 2.70 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$
 $\Delta\theta = 0.2(\text{s})$ $m = 19.3(\% \text{ wet basis})$

図8 大豆の凍結シミュレーション (水分19.31%)
 Fig. 8 Freezing simulation for soybeans
 (at moisture content of 19.31%)



$T_{so}=16.04(^{\circ}\text{C})$ $W=3.0 \times 10^{-4}(\text{kg})$
 $T_L=-195.8(^{\circ}\text{C})$ $A=4.08 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$
 $\Delta\theta=0.2(\text{s})$ $m=28.4(\% \text{ wet basis})$

図9 大豆の凍結シミュレーション (水分28.4%)
 Fig. 9 Freezing simulation for soybeans
 (at moisture content of 28.4%)



$T_{so}=12.27(^{\circ}\text{C})$ $W=3.0 \times 10^{-4}(\text{kg})$
 $T_L=-195.8(^{\circ}\text{C})$ $A=3.00 \times 10^{-4}(\text{m}^2)$
 $\Delta\theta=0.2(\text{s})$ $m=39.4(\% \text{ wet basis})$

図10 大豆の凍結シミュレーション (水分39.4%)
 Fig. 10 Freezing simulation for soybeans
 (at moisture content of 39.4%)

係関数として、コンピュータ上で α/W の値を逐次ずらしながら標準偏差が最小となる値を繰返し計算によって求めた。

この比例定数 α の値から実際の熱伝達率 h を求めるには、熱伝達率の定義から、

$$\alpha(T_s - T_L)^n = hA(T_s - T_L)$$

$$\therefore h = \frac{\alpha(T_s - T_L)^{n-1}}{A} \quad (18)$$

で計算すればよい。すなわち、凍結の進行とともに熱伝達率は変化するのである。

この式によって計算した熱伝達率の値は、

図2 (過熱度211°C) $1.25 \times 10^3(\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$

図8 (過熱度211°C) $1.34 \times 10^3(\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$

図9 (過熱度212°C) $1.31 \times 10^3(\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$

図11 (過熱度208°C) $1.44 \times 10^3(\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$

であり、核沸騰熱伝達時の熱伝達率は、過熱度218°C) すなわち20°Cの大豆を投入した場合の熱伝達率に換算して平均で $1.45 \times 10^3(\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ となる。

IV 結 論

大豆の凍結に伝熱効率の良い沸騰熱伝達を利用する上で必要な基礎データを提供するため、粒子凍結時の粒子温度の変化を測定し、同時に表面沸騰状態を高感度フィルムと高速度シャッターカメラによって写真観測し解析を行なった結果、次の結論を得た。

1) 粒子径が小さいことから、粒内温度分布を無視し、粒子温度の関数としての凍結率式を考慮した次の熱収支式を Runge-Kutta-Gill 法で逐次計算することで、大豆粒子の凍結シミュレーションは可能である。

$$\frac{\partial T_s}{\partial \theta} = - \frac{\alpha(T_s - T_L)^n}{W \left(C_s - \frac{\delta' m (2.149 T_s + \sigma)}{T_s^2} \right)}$$

2) 通常大気温度から凍結された大豆の沸騰熱伝達の沸騰形態は核沸騰であり、凍結シミュレーションによって、核沸騰熱伝達時の熱伝達率が次のように求められた。

$$h = 1.45 \times 10^3(\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

(過熱度218°Cの時)

記 号(Nomenclature)

A : 粒子表面積 (surface area of a soybean seed, m^2)

C_s : 粒子の比熱 (specific heat of a soybean seed, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

C_1 : 氷の比熱 (specific heat of ice, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

C_2 : 水の比熱 (specific heat of water, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

C_3 : 乾物の比熱 (specific heat of dry matter contained in a soybean seed, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

g : 重力加速度 (gravitational acceleration)

tion, m/s^2)

h : 核沸騰熱伝達率 (heat transfer coefficient in nucleate boiling, $kJ/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$)

L : 液体窒素の蒸発潜熱 (latent heat of liquid nitrogen, kJ/kg)

m, m' : 水分 (moisture content of a soybean seed, % wet basis)

p : 系の圧力 (pressure of system N/m^2)

p_a : 標準大気圧 (atmospheric pressure at standard conditions, N/m^2)

Pr_L : 液体のプラントル数 (Prandtl number of liquid, -)

q_s : 熱流束 (heat flux, $kJ/m^2 \cdot h$)

T_f : 凍結点 (freezing point, $^\circ C$)

T_L : 液体窒素温度 (temperature of liquid nitrogen, $^\circ C$)

T_s : 粒子温度 (Celsius temperature of a soybean seed, $^\circ C$)

V_L : 液体窒素の比容積 (specific volume of liquid nitrogen, m^3/kg)

V_s : 気体窒素の比容積 (specific volume of nitrogen gas, m^3/kg)

W : 粒子質量 (weight of a soybean seed, kg)

X : 凍結率 (freezing ratio, -)

α : 比例定数 (proportional constant, $kJ/h \cdot ^\circ C$)

γ : 式(2)で定義される定数 (a constant defined by equation (2), -)

γ' : 式(4)で定義される定数 (a constant defined by equation (4), -)

δ : 式(2)で定義される定数 (a constant defined by equation (2), $^\circ C$)

δ' : 式(5)で定義される定数 (a constant defined by equation (5), $^\circ C$)

ϵ : 液体窒素の表面張力 (surface tension of liquid nitrogen, mN/m)

θ : 時間 (time, h)

λ_L : 液体の熱伝導率 (heat conduction coefficient of fluid, $J/m \cdot h \cdot ^\circ C$)

ν_L : 液体の動粘性係数 (kinematic viscosity of fluid, m^2/s)

ρ_v : 飽和蒸気の密度 (density of saturated vapour, kg/m^3)

ρ_L : 液体の密度 (density of liquid, kg/m^3)

σ : 純水の融解潜熱 (latent heat in melting of pure ice, kJ/kg)

謝 辞

本研究に際し、供試用大豆を御提供頂いた福岡県農業試験場藤井秀明氏に記して謝意を表す。

補遺 I (Appendix I)

初期含水率が異なっても、凍結開始後は、同じ温度における、未凍結水溶液の濃度は等しい。水溶液の凍結では水のみが固体(氷)となるので、溶質の量が等しいとすれば(乾燥による水分変化は、溶質量の変化を伴わぬ)、結局これは未凍結水の量が等しいことを意味する。したがって、次式が成立する。

$$m(1-X) = m'(1-X') \quad (I-1)$$

したがって、

$$X' = 1 - \frac{m}{m'}(1-X)$$

これは、初期水分 m で凍結率が X であったとして、初期水分が m' の場合の同じ温度における凍結率 X' を推定する式である。

これに X と T_s の関係式

$$X = \gamma - \frac{\delta}{T_s}$$

を代入すれば、

$$X' = \left\{ 1 - \frac{m}{m'}(1-\gamma) \right\} - \frac{1}{T_s} \left(\frac{m}{m'} \delta \right)$$

したがって、

$$\gamma' = 1 - \frac{m}{m'}(1-\delta)$$

$$\delta' = \frac{m}{m'} \delta$$

参 考 文 献

- 1) Shemsanga K. H. H., Uchida, S. Ishibashi: Influence of Moisture Content on the Mechanical Properties of Soybeans at Cryogenic Temperatures, J. Fac. Agr., Kyushu Univ., 28(2, 3), 123-134, 1983
- 2) 満田正司: 農作物の低温物性, 九州大学卒業論文, 1978
- 3) 福里良也: LNG 冷熱による農産物の急速凍結・凍結粉碎に関する研究, 九州大学卒業論文, 1983
- 4) 松下 馨: 大豆の凍結粉碎に関する研究, 九州大学卒業論文, 1984
- 5) 農業機械学会編: 穀物の水分測定方法の基準, 1975

- 6) 堤 忠一, 永原太郎, 室井 要, 小川邦彦: 乾燥法による豆類の水分定量 (第2報), 食糧研究所報告, 17, 18, 18-23, 1963
- 7) 例えば P.W. ATKINS (千原秀昭, 中村亘男訳): 物理化学, 東京化学同人, 322-340, 1990
- 8) 加藤舜郎: 食品冷凍の理論と応用, 光琳書院, 314-332, 1966
- 9) Jowitt R., Escher F., Bengt Hallstrom, H.F. Th Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos: Physical Properties of Foods, Applied Science Publishers, 269-312, 1983
- 10) 村田 敏: 流動層式冷結器における凍結時間の推定理論, 九大農学芸誌, 27, 3, 4, 281-287, 1973
- 11) Kutateladze S.S.: Heat Transfer in Condensation and Boiling, 2nd Ed., 1952
- 12) 西川兼康, 山泉 清: Int. J. Heat Mass Transfer 1, 219, 1960
- 13) Labountzov D.A.: Teploergetika, 7, 76, 1960
- 14) 村田 敏, 田川彰男, 石橋貞人: DSC による穀物の比熱測定, 農機誌, 46(6), 547-554, 1987
(原稿受理平成5年2月4日・質問期限平成6年7月31日)

<新しい出版物>

農業機械学会選書5

穀物の物性値解説

著 者	山下律也
発 行	農業機械学会 平成4年7月5日
造 本	A5版 149頁
定 価	定 価 2,800円 会員特価 2,300円

農産物の収穫後処理操作において、機械や施設の最適設計並びに効果的利用をしようとする場合、対象収穫物の物性を明らかにすることが必須である。本書は農業機械学会の選書5号として出版されたもので、収穫後処理機械・施設の設計・利用と品質評価、さらに関連用語の解説や測定・表示法などについて記述しており、設計者、研究開発者、利用者、学生など多くの方々に有益な内容を含んでいる。

内 容

第1編 穀物物性値

- | | | |
|-----|------------|--------|
| 序 章 | 理工学的性質について | |
| 第1章 | 基礎的特性 | (19項目) |
| 第2章 | 力学的特性 | (16項目) |
| 第3章 | 工学的物性 | (10項目) |
| 第4章 | 熱及び物質移動 | (26項目) |
| 第5章 | 電気的特性 | (6項目) |
| 第6章 | 流体力学的特性 | (11項目) |
| 第7章 | 品質評価 | (11項目) |

第2編 用語・表示法

- | | | |
|-----|---------------|--------|
| 第1章 | 用語解説 | (13項目) |
| 第2章 | 測定・検査・表示法・その他 | (11項目) |