有限要素法によるロースハムの製造工程における熱解析

宮原晃義*・木幡聡美*・森地敏樹*

Thermal Analysis of Loin Ham by Finite Element Method

Mitsuyoshi MIYAHARA*, Satomi KOBATA* and Toshiki MORICH*

*Lab. Animal Products, Dept. Animal Sci. & Resource, College of Bioresource Sciences, Nihon Univ., 1866 Kameino, Fujisawa-shi, Kanagawa, 252-8510

Using a computer software (ANSYS) for the thermal analysis by finite element method, a computer simulation was carried out concerning temperature changes in loin ham in the thermal treatment process and these analyzed values were compared with the measured ones. Preparing a 1/8 division model of loin ham, thermal analyses were performed with a tetrahedral thermal solid 10 nodes 3-D space and element numbers of 1781. Thermal conductivity, density, and specific heat of the material used were 0.495 (W/m·K), 1.075×10^3 (kg/m³), and 3.537×10^3 (J/kg·K), respectively. In this thermal analysis, following results were obtained: the analyzed values were about 2°C higher than the measured value in drying process, about 6°C higher in smoking process, and about 2°C lower in cooking process. It revealed that, in drying and smoking processes, latent heat was taken off by evaporating the moisture of loin ham by heating and resulting in lower measured values than the analyzed ones. The thermal analysis of meat products using ANSYS is considered to be effective as a technique to know changes in their internal temperatures, however, it is desirable that further development will be carried out taking the accuracy of physical properties and latent heat into consideration.

(Received Aug. 20, 1997: Accepted Jan. 10, 1998)

工業製品の開発では、有限要素法を利用したコンピュータシミュレーションによって、実験と同等の結果を短時間に得ることができるとされている。これは製品開発の時間を短縮できるばかりでなく、経費の軽減が図れるという点で、金属工業などの分野で利用され実績をあげている。

有限要素法¹⁾を熱伝導に応用した報告は ZIENKIEWICZ と CHEUNG²⁾ が最初とされ、その後いくつかの報告^{3)~5)}が行われた。最近では有限要素法のコンピュータソフトが開発され広く利用されつつある。この有限要素法のうち熱解析を食肉加工分野の熱処理工程に応用すれば、原料の温度変化を的確に把握できるなど、製造過程の効率化に大きな効果が期待できる。また、HACCP(危害分析・重要管理点)方式による食品の製造・加工段階の品質管理における殺菌などの安全性確認にも、有効に利用できると考えられる。しかし、有限要素法による食品の

熱解析に関する報告はない。

そこで、本報ではロースハムの熱処理工程における原料内部温度の経時変化を汎用有限要素法プログラム ANSYS: Revision 5.0 A を用い、コンピュータで熱解析を行って、実測した温度と比較した結果、実測値と近似した値が得られたので報告する。

実験方法

1. 熱物性値の測定

実験材料は、日本大学畜産製造実習所で JIS 規格に従って塩漬・充填した豚のロースハム原料を用いた。

試料の水分含量は常圧加熱乾燥法(105°C, 180 分間乾燥)、粗脂肪分含量はソックスレー脂肪抽出法、密度 ρ は水中置換法(20°C)、熱伝導率 λ は平行平板法⁶⁾、比熱 c は示差走査熱量計(セイコー電子工業(株)製 5200 型)でそれぞれ測定し、これらの値を Table 1 に示した。これ

* 日本大学生物資源科学部(〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866)

らの物性値は文献値⁷⁾⁸⁾とはほぼ近い値であった。また、熱伝達率 h はロースハムとその外側の流体との境界面における熱の伝達によるものであり、流体の状態(空気、水、水蒸気、対流速度、温度差)や、ロースハムの状態(熱伝導率、形状、表面の粗密)などによって変動する値であるために測定しにくい。本報では実測値に合わせるために Table 2 に示した値を仮定してコンピュータ解析した。

2. 温度の測定

ロースハムの温度測定は、全自動スモークマシン(花木製作所(株)製 SMA-330 型)内に吊り下げた豚のロースハム原料約 45 本のうち、2 本(重量 1 080 g と 1 150 g)に温度計(宝工業(株)製サーミスタ温度データ集録装置 K-721 型)のサーミスタセンサー(THR-C)を差し込み測定した。

温度の測定部位はロースハム(175×φ85 mm)の中心部(長さ太さの熱中心)と表面部(厚さ約 0.1 mm のケーシングの内側)およびスモークマシン室内の各 2 箇所(測温したハムから 4~5 cm 離れた箇所)の合計 6 箇所を測定した。

熱処理は通常の製造に用いられている条件であり、乾燥工程が 60℃ で 70 分、燻煙工程が 70℃ で 120 分、蒸煮工程が 75℃ で 120 分とした。温度は 3 分間隔で測定し記録した。

Table 1 Properties of loin ham*

Moisture : (%)	61.9
Fat : (%)	13.8
Density : ρ (kg/m ³)	1.075×10^3
Specific heat : c (J/kg·K)	3.537×10^3
Thermal conductivity : λ (W/m·K)	0.495

* JAS standard.

Table 2 Coefficient of heat transfer of loin ham : h (W/m²·K)

Temperature (°C)	h (10 ³)
7	1.236
33	1.312
54	1.331
60	1.357
70	1.381
75	1.381

3. 熱解析条件の設定

熱解析のソフトウェアは、Swanson Analysis Systems, Inc. 製の ANSYS 5.0 A を用いた。熱解析モデルはソリッドモデリングによりロースハムの中心温度が観察できるように 1/8 分割して作成した。

モデル要素は 3 次元 10 節点伝熱の 4 面体とした。要素数は 1 781 であり、この状態を Fig. 1 に示した。

ロースハムの熱伝導率 λ 、密度 ρ 、比熱 c を入力して要素分割を行った。次に雰囲気温度変化に対するロースハムの境界条件(伝熱面と断熱面)を指定入力した。加熱直前におけるロースハムの初期温度を知るために、荷重ステップは積分時間を除いて、ロースハムの熱伝達率 h ($h = q / (t_1 - t_2)$) と雰囲気温度を入力し、初期状態の定常解析をした。この状態を Fig. 2 に示した。

Fig. 1 Modeling of thermal elements of loin ham

Fig. 2 Thermal analysis by computer simulation at the beginning of heating

Fig. 6 Comparison of measured and computer-analyzed temperatures in the center of loin ham

× Measured temperature ○ Computer-analyzed temperature

い温度となった。乾燥と燻煙工程では熱媒体が空気に近い気体であるために、温度上昇によってロースハム中の水分が蒸発する際に蒸発潜熱を奪うことにより、実測した温度は熱解析結果より2~6℃低くなり、一方、ボイル工程では熱媒体が水蒸気に近い気体であるために、ロースハムからの蒸発は少なくなり、潜熱の影響が減少したために解析結果は実測値よりわずかに低い温度となったものと推察される。

今後これらの点を改善し、さらに密度、比熱、熱伝導率、熱伝達率などの温度依存性や材料固有の詳細な熱物性の究明がなされ、これらの値を本プログラムが熱解析に利用できれば、より精度の高い解析が可能となり、肉製品の熱解析に有効に利用できるものと考ええる。

要 約

有限要素法 (ANSYS) の熱解析ソフトを用いてロースハムの製造工程における熱処理過程の温度変化につい

てコンピューターによる熱解析のシミュレーションを行い、実測値と比較を行った。

ロースハムの1/8分割モデルを作成し、3次元10節点伝熱ソリッド、4面体、要素数1781で、材料特性の熱伝導率0.495 (W/m·K)、密度 1.075×10^3 (kg/m³)、比熱 $3.537 \times 10^3 + 3$ (J/kg·K)を用いて熱解析を行った。熱解析結果は実測値より乾燥工程では約2℃高く、燻煙工程では約6℃高く、ボイル工程では約2℃低い結果が得られた。乾燥と燻煙工程では加熱によってロースハムの水分が蒸発するさい潜熱をうばい、温度上昇に影響をあたえて実測値が2~6℃低くなることが認められた。

ANSYSによる食肉製品の熱解析は内部温度の変化を知る意味で有効な手段であるが、さらに物性値の精度と潜熱を考慮したソフトウェアの開発が望まれる。

文 献

- 1) 川井忠彦監訳・築地恒夫・風間悦夫・川端康洋共訳：応用有限要素解析、(丸善、東京)、p. 133 (1978)。
- 2) ZIENKIEWICZ, O.C. and Y.K. CHEUNG : The Engineer, p. 507 (1965)。
- 3) ZIENKIEWICZ, O.C. : The Finite Element Method in Engineering Science, McGRAW HILL, London, p. 521 (1971)。
- 4) WILSON, E.L. and R.E. NICKELL : Nucl. Engineering & Design, 4, 276 (1966)。
- 5) SZABO, B.A. and G.C. LEE : Intern. J. Numer. Meth. in Engin., 1, 301 (1969)。
- 6) 宮原晃義・結城昌夫・四元康博・森地敏樹：食科工, 43, 368 (1996)。
- 7) 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック、(養賢堂、東京)、p. 445 (1990)。
- 8) MOHSENIN, N.N. : Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials, (Gordon & Brach, New York) p. 182 (1980)。

(平成9年8月20日受付, 平成10年1月10日受理)