

豆腐凝固過程の熱移動解析

酒井 昇*・萩原智明*・楊 暉*・東條 愛*

Heat Transfer Analysis of Tofu Coagulation Process

Noboru SAKAI*, Tomoaki HAGIWARA*, Hui YANG* and Ai TOJO*

*Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, 4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477

Tofu is produced by heating soy milk containing a coagulating agent. In this heating process, soy milk gradually coagulates during heating, and loses the fluidity. In order to examine a relationship between this coagulation and heat transfer mechanism, following experiments were carried out. A tofu container was filled with soy milk and $MgCl_2$, and then heated in a 90°C constant temperature bath. Using the thermocouples installed in the container, the temperature change during heating was measured. Perfectly solidified tofu was cooled, and the heating experiment was carried out again. The temperature change of solidified tofu was equal to that in the coagulation process. By cutting off the container under heating, the coagulation process of tofu was observed. The observation result showed that the solidification occurred in the initial stage. From the above results, it was deduced that conductive heat transfer was more dominant than the natural convection. A heat conduction equation was solved using the finite element method, and temperature distribution and temperature change of the container inside were estimated. It was proven that internal temperature change in the tofu coagulation process was predictable by solving the heat conduction equation, because numerically calculated temperature agreed with the measured value well. In addition, it was shown that the two-dimensional analytic solution agreed with the solution by the finite element method and that temperature prediction is possible using the analytic solution.

(Received Mar. 26, 2001 ; Accepted Jul. 13, 2001)

豆腐は古くから食され、親しまれてきた伝統食品である。伝統的製造法では、加熱された豆乳に凝固剤を添加することにより豆乳は凝固するが、凝固剤を投入する時期、攪拌状態などによって製品の性状は大きく変化し、職人的な技術が必要とされてきた¹⁾。しかし、近年では豆腐は工場で大量に生産されるようになり、職人技を必要としない方法で製造されている。すなわち、豆乳を冷却した状態（凝固が起こらない状態）で凝固剤を完全に混合し、その後加熱して凝固させる。この加熱過程では、豆乳は加熱されると同時に徐々に凝固し、流動性が失われると考えられる。そのため、熱移動機構は自然対流熱伝達から熱伝導へ移行するものと思われる。生産管理の観点から、この熱移動機構を理解し、豆腐内部の温度変

化を予測することは非常に重要である。しかしながら豆腐凝固過程の熱移動現象に関する研究は非常に少ないのが現状である。そこで、本研究では豆腐凝固状態の観察をするとともに熱移動解析を行い、豆腐内部の温度予測に関して検討を行った。

実験方法

使用した豆腐の容器は、市販されている充填豆腐用の容器で、容器および豆乳は四国加工機(株)より提供を受けたものである。またこの容器は台形の断面を持つ厚さ0.5 mmのポリプロピレン製である。この容器内の温度を測定するために、側面に孔を開け熱電対をセットした。容器の断面概略図および温度測定位置を図1に示

* 東京水産大学 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

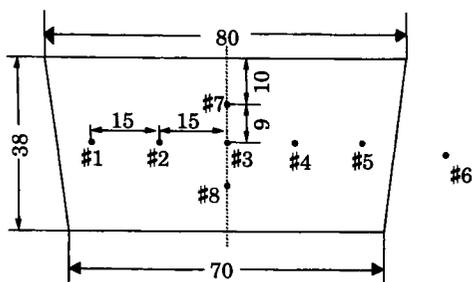


図 1 容器断面概略図

す。なお、図中の番号は熱電対の番号に対応し、#6は恒温槽の温度である。

約 5°C に冷却した豆乳と凝固剤を混合した後、容器に充填し空気が入らないように容器を密封する。なお、凝固剤としては塩化マグネシウム ($MgCl_2$) を使用した。この他、豆腐の凝固剤としては、硫酸カルシウム、グルコノ- δ -ラクトンなど²⁾が挙げられるが出来た豆腐の「美味しさ」の点では、塩化マグネシウムが一番すぐれていると言われている。豆乳と混ぜたときに 0.5 wt% の $MgCl_2$ 濃度となるように量を調節した。この豆乳を充填した容器を 90°C の恒温槽に入れると同時に容器内部の温度をデータロガーで採取し、記録した。また、比較のために凝固剤を投入しない場合、および完全に豆乳が凝固した後冷却し再び加熱した場合についても同様に温度測定を行った。

さらに、加熱途中の凝固状態を観察するため、所定の時間で容器を恒温槽から取り出し、容器を切断し断面を写真撮影した。

結果および考察

1. 温度測定および観察結果

まず、豆腐内部の温度分布に及ぼす凝固の影響を調べるために、豆乳に凝固剤を添加した場合と添加しない場合について実験を行った。凝固剤を添加しない時の温度測定結果を図 2 に、凝固剤を添加した時の結果を図 3 に示した。両者を比較すると、凝固剤を添加すると、温度上昇速度は小さくなり、容器内での温度分布も大きくなっていることが分かる。これは、凝固剤を添加すると豆乳が凝固し、容器内の伝熱は伝導が支配的になると考えられる。

次に加熱がどの程度進んだ段階で伝導が支配的となるかを確かめるために、完全に凝固して豆腐とした試料を冷却して、再加熱した実験と比較した。冷却後再加熱し

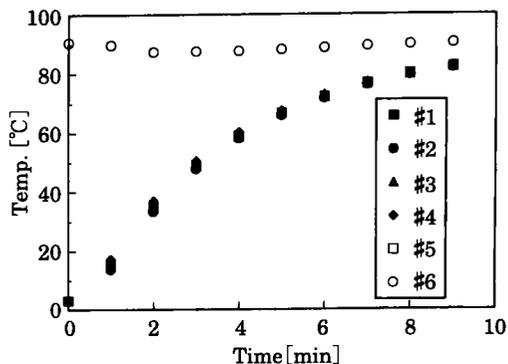


図 2 凝固剤を添加しない豆乳の温度変化

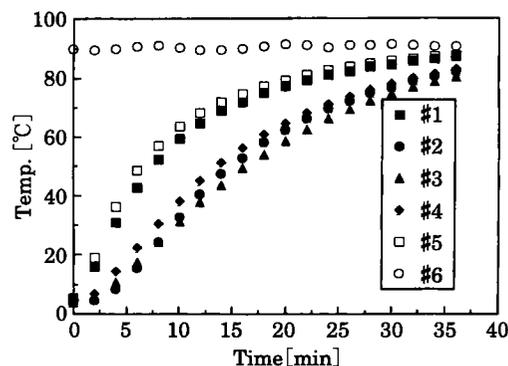


図 3 凝固剤を添加した豆乳の温度変化

た結果を図 4 に示す。図 3 と比較すると各点の温度上昇の様子はほぼ等しいことが分かる。また、中心部の温度 (#3) だけを比較した結果を図 5 に示す。図 5 には比較のために凝固剤を添加せずに豆乳を加熱した場合も示した。加熱の初期段階で自然対流が起り、豆乳の凝固とともに熱伝導が支配的になると考えると、凝固剤を添加した豆乳の温度履歴は初期には豆乳のみの温度履歴をたどり途中から遅くなると考えられる。しかしながら初期の予想に反し、実際にはその温度履歴はほとんど豆腐のそれと近いことが分かる。

以上のことから、豆腐の凝固は比較的低温で起り、自然対流がほとんど起らないと推察できる。このことを確認するために所定時間加熱した容器を取り出し、すばやく切断して凝固状態を観察した。2分、5分、10分、20分加熱した結果を図 6 に示す。なお、写真ではふたの面が下となっている。

2分加熱した場合はまだ凝固があまり進行せず、その

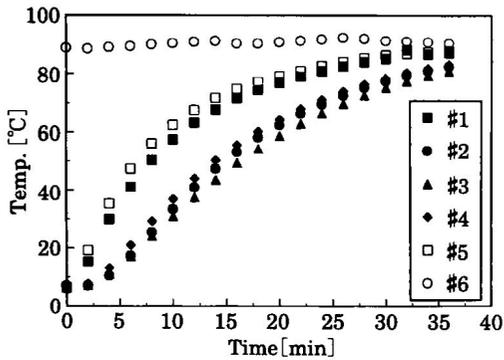


図4 凝固後冷却した豆腐の温度変化

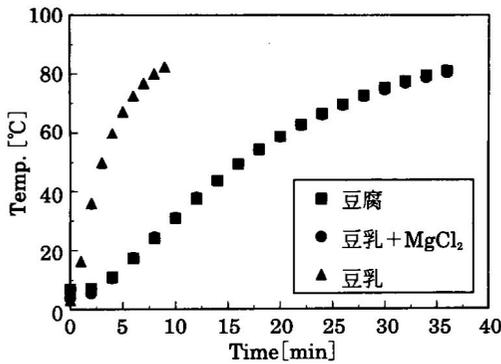


図5 中心(#3)における温度変化の比較

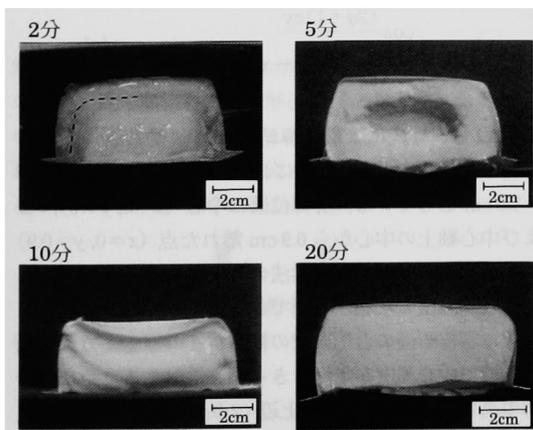


図6 加熱途中の試料断面写真

ままでは切断が困難であったので、容器のふたをはずした後ふたに接して凝固した部分を取り除いて、溶液を流し出した。そのため加熱2分の写真において、ふたの面に凝固した層は写っていない。また、加熱2分の写真において、壁面に凝固した層の厚さが写真では明確ではないので、容器左半分に凝固層を点線で示した。この図から、容器の回りに8mm程度の厚さに凝固していることが分かる。

加熱時間が5分になると凝固はさらに進み、10分になると完全に中心まで凝固していることが分かる。しかし、中心まで凝固はしているが豆腐の固さはなく、かなり柔らかい状態であった。20分になると固くなり豆腐に近い状態となっていることが分かる。

2. 豆腐中心温度の予測

1.の結果から、本実験条件では豆腐の凝固過程では自然対流がほとんど起こらず、熱伝導が支配的であることが分かった。そこで、実際に熱伝導として内部の温度が予測可能か以下の検討を行った。

図1に示した台形の容器を考えると、この面における2次元熱伝導を考える。豆乳の熱拡散率は温度によらず一定とし、容器外部の熱抵抗は無いものとする、基礎式および境界条件、初期条件は以下ようになる。

基礎式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

境界条件

$$T = T_a \quad \text{at wall of vessel} \quad (2)$$

初期条件

$$T = T_0 \quad \text{inside of vessel} \quad (3)$$

以上の式を無次元化し、有限要素法により容器内部の温度変化を求めた。なお、豆乳の水分含量は89%でほとんどが水なので、熱拡散率の値は水の値 ($1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) を用いた。

横方向および縦方向の温度計算結果と実測値の比較を図7, 8に示す。プロットが実測値で、実線が計算結果である。同図より計算結果は実測値と良好に一致しており、本実験条件下では熱伝導方程式を解くことにより、豆腐凝固過程の内部温度変化が予測できることが分かる。

次に、豆乳の流動性と内部温度との関係を検討する。図9, 10に加熱時間2分および5分における容器内温度分布の計算結果を示す。加熱時間2分の凝固状態(図6)をみると、容器壁からおよそ0.8cmの厚さで凝固している。この位置において、計算温度はまだ約20~30°Cで

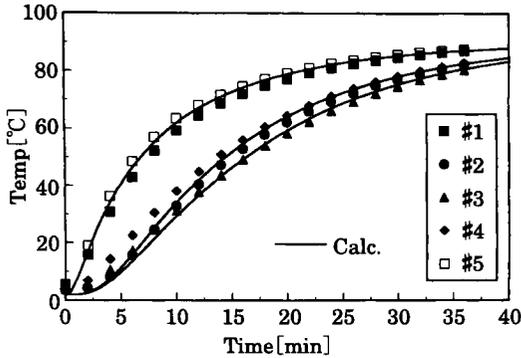


図 7 数値計算結果と実測値の比較 (横方向)

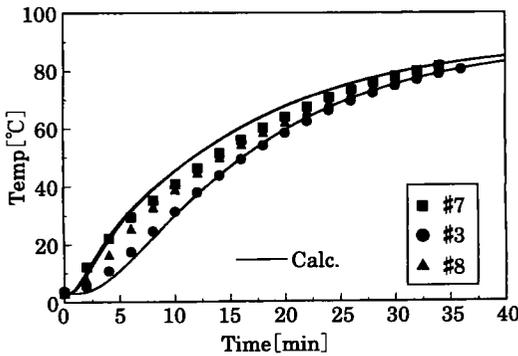


図 8 数値計算結果と実測値の比較 (縦方向)

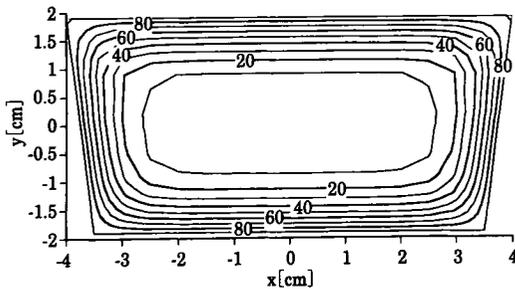


図 9 2 分後の温度分布計算結果

あり、早い段階で凝固していることが分かる。さらに、5 分後の計算結果と凝固状態と比較するとやはり計算温度 20°C においてすでに凝固している。以上のことから、豆乳は加熱されると早い時期に凝固し、流動性がなくなることから自然対流はほとんど起こらないと予想される。

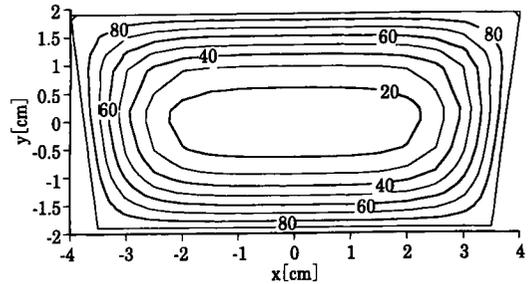


図 10 5 分後の温度分布計算結果

また、図 9, 10 の温度分布をみると、断面が台形であることが中心付近の温度分布にほとんど影響を与えていないことが予想される。すなわち断面を長方形と考えることができ、長方形についての 2 次元解析解が利用できる可能性がある。その場合有限要素法による数値計算は必要なく、計算は非常に簡単化される。そこで、以下のように解析解を利用した温度予測について検討した。

容器断面を厚さ $2L$ 、幅 $2D$ の長方形と考える。初期温度を一定 (T_0) とし、時間 0 で温度 T_a の熱水中に入れて加熱したとすると、ある点 (x, y) における温度 T は次式で計算できる³⁾。

$$u = \frac{T_a - T}{T_a - T_0} = 16 \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} (-1)^p \frac{\cos \frac{(2p+1)\pi x}{2D}}{(2p+1)\pi} \exp\left\{-\frac{\alpha(2p+1)^2\pi^2}{4D^2}t\right\} \times (-1)^q \frac{\cos \frac{(2q+1)\pi y}{2L}}{(2q+1)\pi} \exp\left\{-\frac{\alpha(2q+1)^2\pi^2}{4L^2}t\right\} \quad (4)$$

図 11 に (4) 式による計算結果と有限要素法による計算結果の比較を示す。計算においては、 $2L=3.8$ cm、 $2D=7.5$ cm としている。計算位置は中心 ($x=0, y=0$)、および中心軸上の中心から 0.9 cm 離れた点 ($x=0, y=0.9$) である。解析解は有限要素法の解と最後までほぼ一致しており、温度の予測が可能であることが分かる。

次に容器断面の台形側壁の傾きがどの程度まで 2 次元解析解で中心温度が予測できるかを検討するために、台形の高さ (3.8 cm) および上辺 ($2D_1=8$ cm) を一定として、底辺 $2D_2$ を 2~8 cm に変えて、2 次元解析解 (長方) と有限要素法の解 (台形) を比較した。なお、解析解における長方形の長さは上辺と底辺の平均値 ($D=(D_1+D_2)/2$) とした。比較結果を図 12 に示す。プロットが有

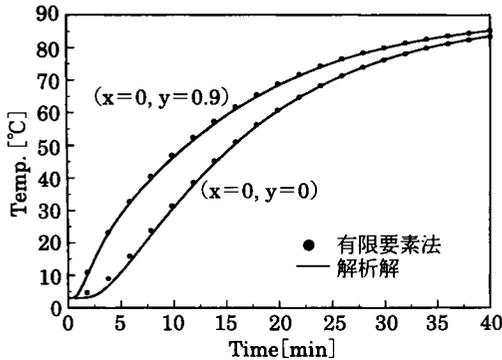


図 11 有限要素法と解析解の比較

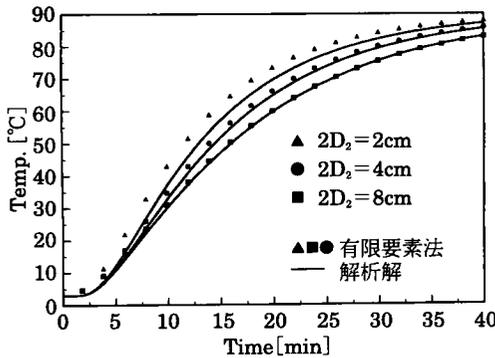


図 12 台形底辺の長さを変えたときの有限要素法と解析解の比較

有限要素法による解で、実線が解析解である。底辺が 2cm の場合、長方形に近似した解析解による温度は台形のものよりも低いが、底辺が 4 cm 程度であれば 1°C 以内の誤差で予測が可能である。従って、底辺が極端に短くならない限り解析解を用いることができる。

要 約

豆腐凝固過程の熱移動解析および凝固状態の観察を行い、以下の結果を得た。

(1) 凝固剤を添加した豆乳の各点の温度上昇は、完全に凝固した豆腐の温度上昇とはほぼ一致した。

(2) 加熱途中の豆腐容器を取り出し、内部の凝固状態を観察したところ、初期の段階で凝固し、流動性が失われることが確認できた。(1)の結果と合わせて、凝固過程の熱移動は熱伝導が支配的であると考えられる。

(3) 熱伝導方程式を支配方程式として、温度分布を有限要素法により求め、実測値と比較したところ、両者は良好に一致した。さらに、2次元解析解を用いても中心点の時間変化は予測可能であることが分かった。

本研究経費の一部は、日本食品機械工業会に援助を頂いた。また、本研究の企画・遂行にあたり渡辺尚彦氏(東京水産大学地域共同研究センター長)にご助力頂いた。ここに記して謝意を表したい。

使用記号

D : (容器幅)/2	[cm]
D_1 : (台形容器上辺)/2	[cm]
D_2 : (台形容器底辺)/2	[cm]
L : (容器高さ)/2	[cm]
T : 温度	[°C]
T_a : 恒温槽温度	[°C]
T_0 : 豆乳初期温度	[°C]
u : 無次元温度 ($= (T_a - T) / (T_a - T_0)$)	[-]
x : 容器横方向変数	[cm]
y : 容器高さ方向変数	[cm]
α : 熱拡散率	[cm ² /s]

文 献

- 藤巻正生・三浦 洋・大塚謙一・川端俊治・木村進：食品工業，第一版（恒星社厚生閣，東京），p. 261 (1985).
- 山内文男・大久保一良編：大豆の科学，第一版（朝倉書店，東京），p. 88 (1992).
- 野中順三九・三善清旭：缶詰殺菌の理論と実際，第一版（恒星社厚生閣，東京）p. 128 (1963).

(平成 13 年 3 月 26 日受付，平成 13 年 7 月 13 日受理)