

サイドシール用熱刃設計に関する研究 (有限要素解析の有効性について)

西坂 強*、土井 猛志**、白岩 寛之**

Study on the Design of the Heat Cutter for Side Seal (The Effectiveness of the Finite Element Analysis)

Tsuyoshi NISHIZAKA*, Takeshi DOI** and Hiroyuki SHIRAIWA**

プラスチックフィルムの製袋方法の一つであるサイドシール法で作られた袋において、その接合部強度は非常に重要であり、それに及ぼす製造条件や熱刃の材質、形状の影響等についての研究報告は少ないようである。そのような中で、著者らはこれまでに、フィルムに直接接触する熱刃先端部の熱的挙動に着目し、熱刃を設計する上で重要となる熱刃材質や形状の影響について、FEM解析によって推定できる可能性について報告した。しかし、実際の熱刃における熱的挙動との比較検討については今後の課題となっていた。そこで本研究では、サイドシール用熱刃の基本的な熱的挙動を実験により把握し、それをFEM解析によって模擬した結果と比較を行い本手法の妥当性を検討した。その結果、実際の温度測定が困難な熱刃先端部付近や熱刃全体の温度分布について推定が可能となり、熱刃設計においてFEM解析を用いることは非常に有効であることが明らかとなった。

Recently, many bags made of plastic film came to be used. Side seal method is one of the bag-making methods. There seem to be few research reports about the effect of manufacturing conditions, heat cutter material and the heat cutter shape on the side seal strength. Then, we focused on thermal behavior at the tip of heat cutter which touches films directly. Then, so far we reported about the possibility that the effect of heat cutter material and shape which became important in designing the heat cutter were estimated by Finite Element analysis (FE analysis). However, comparing results of FE analysis with thermal behavior of the actual heat cutter and examining them has become a challenge for the future. So, in this study, we measured the temperature of the heat cutter and grasped basic thermal behavior of it. Furthermore, we compared results of FE analysis with them, and investigated the validity of this method. Consequently, it was found that it was possible to estimate the temperature distribution in the whole heat cutter including the neighborhood at the cutter tip where it was difficult to measure, and it was very effective to use FE analysis in the heat cutter design.

キーワード：熱刃、サイドシール、有限要素解析、熱伝達

Keywords : heat cutter, side seal, finite element analysis, heat transfer

** 呉工業高等専門学校 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11)

** 都城工業高等専門学校 (〒885-8567 宮崎県都城市吉尾町 473-1)

1. 緒言

現在、プラスチック製フィルムを用いた袋が多く利用されるようになった。その製袋方法には種々のものが存在しており、各種利用形態に合わせた方法により製造されている。これら袋に求められる最も重要な要件の一つとして接合部強度が挙げられ、これに関しては、ヒートシール（インパルス式）の接合強度に及ぼす接合温度や接合圧力の影響について、種々のフィルムに対し研究が行われており報告がなされている¹⁻²⁾。一方、他の製袋方法として、シールしたい部分のフィルムを瞬間的に溶かして接着する溶断型のサイドシールが挙げられ、本方法における接合部強度（シール強度）について調査・研究することも非常に重要であると考えられるが、製造条件や使用する熱刃の材質、形状の影響等について研究がなされている報告は少ないようである。そのような中、著者らはこれまでに、サイドシール法によって製造された袋の強度試験を行い、そこで得られた破断荷重と各操作条件との関係について技術報告を行った。さらにその中で、実際の熱刃においては測定が困難な熱刃先端部分の熱的挙動に着目し、熱刃材

質や形状を変えた場合について数値解析を行い、熱刃先端部における温度変化を推定した³⁾。その報告における数値解析では、熱刃の非定常熱伝導問題に対して有限要素法（FEM）を適用し、熱刃先端部分の熱的挙動を数値解析的に推定できる可能性を示すことができた。しかしながら、実際の刃における熱的挙動との比較検討については今後の課題となっていた。

そこで本研究では、種々の製袋方法がある中で、前述のサイドシール法を取り上げ、その中で用いられる熱刃の基本的な熱的挙動について実験および数値解析を行う。そして、それらを比較検討することにより、サイドシール用熱刃設計における有限要素解析の有効性について検討し、熱刃先端付近の熱的挙動に対し、妥当な数値解を得ることが出来る有限要素解析を用いた熱的挙動の推定手法を構築する。最終目標として、熱刃の材質・形状の最適化を設計段階で確立することを目指す。

2. 実験方法

2.1 モデル試験

実験で用いる熱刃の断面形状および熱刃寸法を、それぞれ Fig.1 および Table 1 に示す。

Table 1 Dimension of heat cutter

h_1	38 mm
h_2	4.25 mm
h_3	25.5 mm
b_1	34 mm
b_2	3 mm
θ_1	90°
θ_2	90°
ϕ_1	10.2 mm
L	150 mm

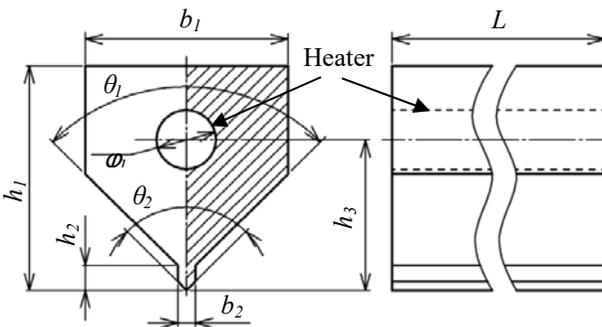


Fig.1 Shape of heat cutter

熱刃の材質は SUS304 製であり, Fig.1 に示す ϕ_1 部分にはヒータ(直径 10 mm, 長さ 150 mm) が挿入される. なお, ヒータの挿入の際には, それらの外表面に伝熱グリースを均一に塗布し挿入する. 以下に, 測定方法・手順を示す.

熱刃表面, 内部温度および環境温度を K 型熱電対およびデータロガーを用いて測定する.

Fig.2 は, 熱刃長手方向 ($L=150$ mm) の中央断面 ($L/2=75$ mm の位置) における温度測定位置 (図中の $P_1 \sim P_3$) を示す. P_2 の熱刃内部温度については, 熱刃側面からシース熱電対(外径 1.0 mm) を挿入して測定する. また, ヒータ設定温度は 350 °C (本設定温度は, フィルム材質が PP, PE, PET とそれらのラミネートの場合におけるフィルム厚さ $20 \sim 50$ μ m の切断を想定したもの) とする. ここで, ヒータ設定温度は, P_3 における温度を用いた ON-OFF 制御を行う. P_3 における温度は, その位置まで熱刃長手方向の中央部上面から, 先端に伝熱グリースを塗布したシース熱電対(外径 1.6 mm) を挿入し, その先端をヒータ

外表面に接触させて測定する. また, 熱刃表面からの対流熱伝達について調べるため, 熱刃周辺の環境温度および P_1 の近傍に熱流束センサーを取付け熱流束の測定を行い, 後述する FEM 解析モデルにおいて必要となる熱伝達係数を求める.

製袋時を想定した熱刃の非定常温度特性の評価を行うために, 定常状態に達した熱刃の刃先に水を十分に含ませた吸水紙を押し付けて離し(製袋時におけるフィルムへの熱刃の押し付けを想定), その後の温度回復の推移について数値解析結果と比較検討を行う. 実験手順について, 以下(1)~(4)に示す.

- (1) 幅 70 mm の吸水紙(厚さ 0.5 mm) に十分に水を含ませておく.
- (2) ヒータを所定温度 (350 °C) に設定し, 温度計測を開始する(温度測定時間間隔 0.1 s). その後, 熱刃が定常状態になるように 20 分間放置する.
- (3) 吸水紙を熱刃先端の長手方向中央付近に 5 秒間押し付けて(押し付け力約 6 N), 離す.
- (4) その後, 10 分間実験を継続し, 終了する.

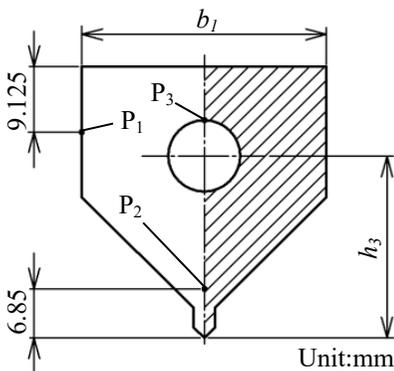


Fig.2 Thermometry positions

2.2 FEM 解析のモデル化

サイドシールによる製袋法は, 高温の熱刃が一定サイクルで上下運動し, 最下降点において袋の素材となる重なった二枚のフィルムを瞬間的に溶かして接着する. この 1 サイクル分の熱刃の動きについて経過時間で整理すると, Fig.3 のようにフィルムに①接触する時間と②非接触の時間に大きく分けられる. これを基に熱伝導問題に対する熱刃内部および

表面の各種境界条件を Fig.4 のように設定する。まず熱刃内部については、ヒータによる加熱を模擬するため挿入穴の円周上に対しヒータ設定温度を温度規定する。熱刃表面については、①接触する時間および②非接触の時間に対し、時間経過の過程においてそれぞれの境界条件に切り替えることとする。

接触する時間領域については、フィルム接

触部およびそれ以外の部分に分けて設定する。まず、接触部について、実際の製袋時においてはフィルムやゴムロール等と固体接触すること、およびフィルム熔融に伴い潜熱が吸収されることなど、接触部を介した熱移動が生じると考えられる。そこで本研究では、接触面に適当な熱伝達係数を設定し、これを接触面を介した熱伝達問題と置き換えるものとす

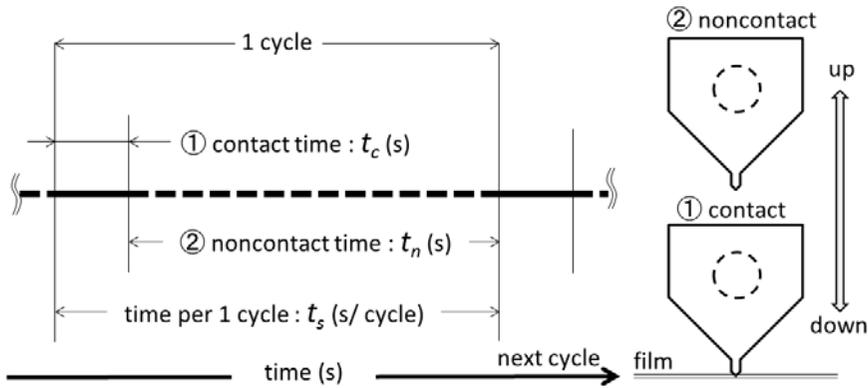


Fig.3 Movement of the heat cutter in 1 cycle

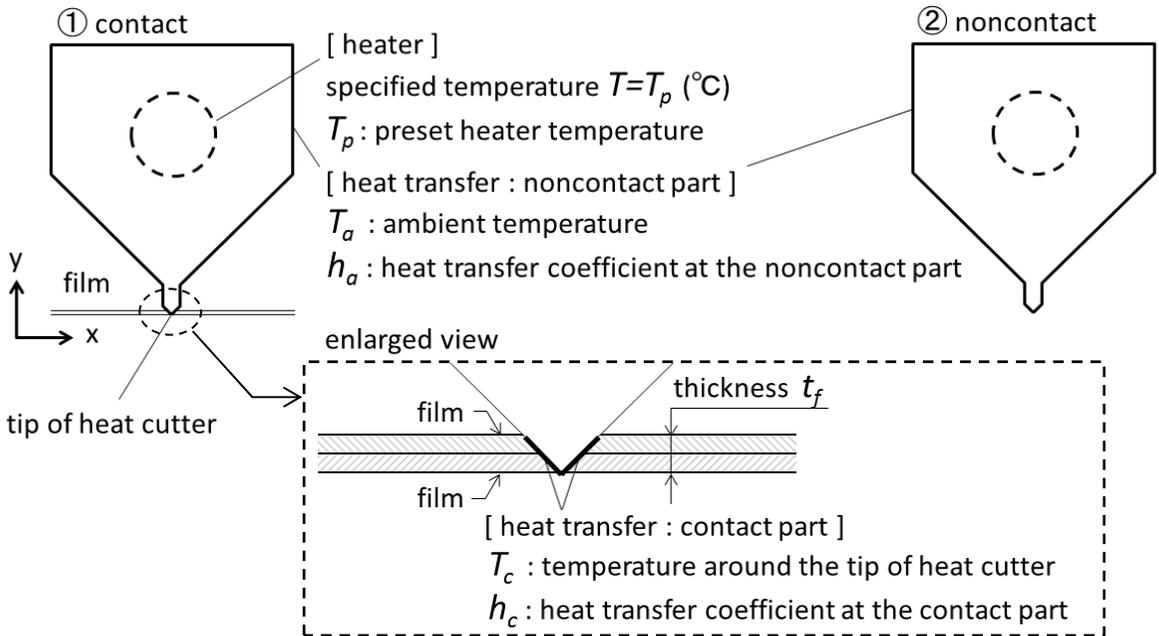


Fig.4 Analysis models and boundary conditions

る。非接触部については、周辺気体との間で熱伝達が起こるものとした。

次に②非接触の時間領域については、前述の①における非接触部と同様に、熱刃全外周面に対し周辺気体との間で熱伝達が起こるものとした。また、熱刃はヒータ加熱による昇温過程を経て定常状態になるまでに適当な時間を要するが、本解析では、その昇温過程まで含め計算を行う。この際用いる熱刃の境界条件は、前述の②非接触の時間領域と同様とした。

以上で述べた解析モデルは、多数サイクルによって製袋される作業時の熱刃をモデル化したものであるが、本研究で実施する 2.1 のモデル実験については、熱刃のヒータによる昇温を経て定常状態に至る「定常過程」および吸水紙の接触・非接触を 1 サイクル分とする「接触過程」の解析を行う。解析で用いる各種物性値や、Fig.3 で示した 1 サイクルにおける熱刃の動き(接触時間および非接触時間)、さらに Fig.4 で示した各種境界条件について Table 2 に示す。なお、熱伝導率、比熱、密度については、SUS304 の物性値表⁴⁾において、ヒータ設定温度 (350 °C) に近い 600 K (326.85 °C) の物性値を利用する。Fig.4 の非接触部における熱伝達係数 h_a については、2.1 のモデル実験で得られた熱流束センサー、環境温度および熱刃表面温度の測定結果から算出する。さらに、Fig.4 の接触部における熱伝達係数 h_c は、2.1 のモデル実験結果を基に数値解析を行い、適当な値を推定し決定するものとする。その際の接触部長さは、モデル実

Table 2 Parameters of analysis

Thermal conductivity k [W/(m · K)]	19
Specific heat c [J/(K · kg)]	556
Density ρ [kg/m ³]	7810
Preset heater temperature T_p [°C]	350
Time per 1 cycle t_s (s/cycle)	120
Contact time t_c (s)	5
time step Δt (s)	0.01

験と同じ条件とする。また、熱刃周辺の温度 T_c は環境温度 T_a と同じとし、モデル実験によって得られた実測値 T_a を用いる。

なお、FEM 解析では、本研究において開発した FEM 解析ソフト (開発言語 : JAVA) を用いる。本ソフトは、熱刃断面を解析対象とし、それを二次元非定常熱伝導問題 (二次元非定常熱伝導方程式を利用) として取り扱い、Fig.4 に示す各種境界条件に対応した解析を行うことが可能である⁵⁾。また、Fig.1 に示す熱刃形状の対称性を利用した 1/2 部分 (斜線部分) に対し、三角形要素による要素分割を行った。

3. 実験結果

3.1 モデル実験の結果

本実験によって得られた定常過程後 (吸水紙押し付け前) の P_1 および P_2 におけるそれぞれの熱刃温度 T_{e1} , T_{e2} 、Fig.4 の非接触部における環境温度 T_a 、さらに測定点 P_1 近傍における h_a (Fig.4 の非接触部における熱伝達係数) の測定結果について Table 3 に示す。また、本実験によって得られた中央断面における

Table 3 Result of a measurement of the heat cutter surface
(the mean value at the time of the noncontact process)

T_{e1} [°C] (at the measurement point P ₁)	326.0
T_{e2} [°C] (at the measurement point P ₂)	334.9
Ambient temperature T_a [°C]	22
heat transfer coefficient h_a [W/(m ² · K)]	30

P₂の熱刃内部温度測定結果については、次節のFEM解析の結果と併せて後述する。

3.2 FEM解析の結果

FEM解析では、前述したようにFig.1に示す熱刃形状の対称性を利用した1/2モデルに対し、節点数2621および要素数4853の三角形要素による要素分割を行った。また、急激な温度変化が予想される熱刃先端付近については、1辺が約0.1 mmの要素とした。以下、解析結果について述べるが、Fig.2に示した測定点P₁およびP₂における定常過程後の熱刃温度の計算結果については、実験結果と区別するため T_{f1} および T_{f2} と表記する。

まず、定常過程における熱刃の熱伝導解析を行った。その際、Fig.4の非接触部における熱伝達係数 h_a は、局所的に異なる係数値を示していると考えられるが、本解析では全領域にわたりモデル実験で得られた数値(Table 3参照)を一様に用いた。また、環境温度 T_a も、 h_a と同様にTable 3に示す実験値を用いた。その結果、定常過程後の T_{f1} および T_{f2} は、それぞれ $T_{f1}=338.0$ °C、 $T_{f2}=333.4$ °Cとなった。

次に、モデル実験における吸水紙試験(接触過程)を模擬するため、Fig.4の接触部における熱伝達係数 h_c について、いくつかの異なる

数値を用いてFEM解析を行い推定した。その際、モデル実験結果(測定点P₂)を基に、その温度変化と一致するような h_c を求め決定した。推定された h_c は25000 W/(m² · K)であった。以上で示した h_a および h_c 、さらにTable 2の各種解析パラメータを用いて計算を行い、そこで得られた接触過程における熱刃内部温度(測定点P₂)の推移について、前節モデル実験の結果と併せてFig.5に示す。

Fig.5が示すとおりモデル実験およびFEM解析結果のどちらにおいても、測定点P₂を含む長手方向中央付近の熱刃先端部に吸水紙を5秒間押し付けたことにより急激な温度降下が生じていることが確認できる。さらに、吸水紙の押し付け終了後から急激に温度上昇した後、徐々に緩やかな温度回復を示していることが分かる。

4.考察

モデル実験およびFEM解析によって得られた結果について考察を行う。

定常過程を経た後の定常状態における熱刃温度(測定点P₁およびP₂)について、Table 3に示す実験結果(T_{e1} および T_{e2})に対し、FEM解析結果(T_{f1} および T_{f2})を比較する。その結果、測定点P₁においては+12 °C

(+3.7 %) の差が生じているものの、測定点 P_2 においては $-1.5\text{ }^\circ\text{C}$ ($-0.4\text{ }\%$) の差となり、本解析で設定した物性値および解析パラメータを用いれば、モデル実験を良く再現できることが確認できた。

また、定常過程において用いた熱刃全外周面と周辺気体との間の熱伝達係数 $h_a=30\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ は、実験によって得られたものを用いたが、本係数の影響について検討するため、静止した空気における大体の値⁵⁾を参考に、この二分の一の値 $h_a=15\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ として計算を行った。その結果、測定点 P_1 および P_2 における実験値との比較において、それぞれ $+17.8\text{ }^\circ\text{C}$ ($+5.5\text{ }\%$)、 $+6.6\text{ }^\circ\text{C}$ ($+2.0\text{ }\%$) の差となり、 $h_a=30\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と比較し、モデル実験との差が大きくなった。このことから、熱刃全外周面と周辺気体との間の熱伝達係数は、熱刃の熱的挙動を定量的に評価する際に、重要なパラメータであることが確認でき、実

際の製造工程における熱刃において、周辺環境の影響を大きく受けていることを示唆する結果となった。

さらに、熱刃物性値の影響についても検討を行った。これまでに用いた数値はヒータ設定温度 ($350\text{ }^\circ\text{C}$) に近い 600 K ($326.85\text{ }^\circ\text{C}$) を使用しているが、これを環境温度程度の 300 K ($26.85\text{ }^\circ\text{C}$) における物性値として、熱伝導率 $k=16\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、比熱 $c=499\text{ J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ および密度 $\rho=7920\text{ kg}/\text{m}^3$ を用いて計算を行った。その結果、測定点 P_1 および P_2 における実験値と比較すると、それぞれ $+16.7\text{ }^\circ\text{C}$ ($+5.1\text{ }\%$)、 $+5.0\text{ }^\circ\text{C}$ ($+1.5\text{ }\%$) の差となり、 600 K における物性値の場合と比較し、モデル実験との差が大きくなった。このことから、定量的な評価を行う場合は、使用する材料の各種物性値における温度依存性についても考慮の必要があることが確認できた。

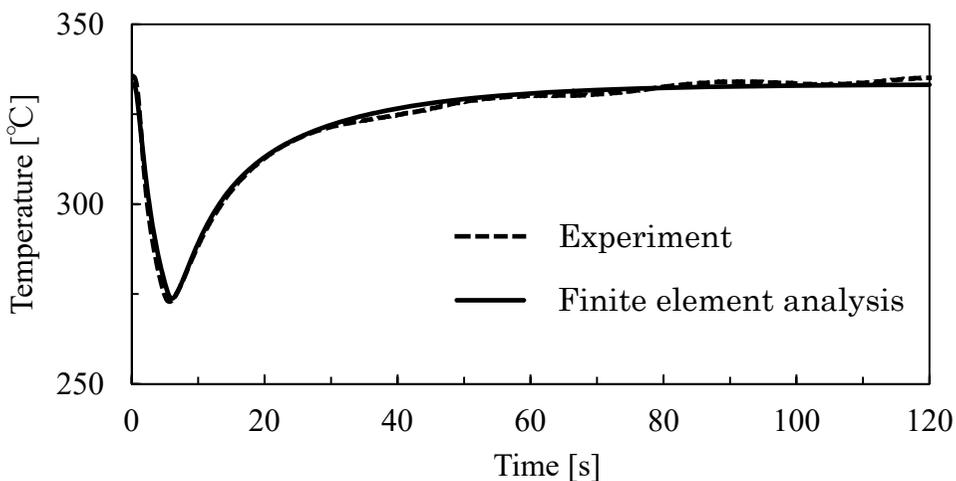


Fig.5 Temperature change of the measurement point P_2 in the process to push a water absorbing paper after a heating-up process

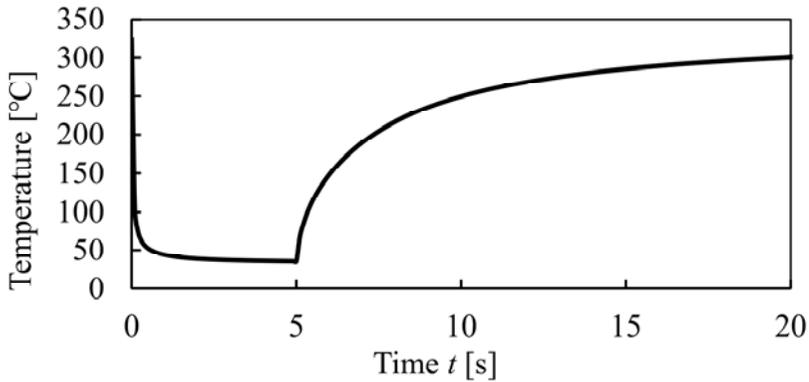
次に、**Fig.5** に示す接触過程の計算結果と実験結果について比較を行う。定常過程における比較結果と同様に、接触過程における熱刃温度（測定点 P_2 ）の変化もモデル実験と解析結果は良く一致している。これは、FEM 解析において、初めに熱刃の定常状態をよく再現できる各種解析パラメータを設定し、その後、モデル実験（接触課程）における測定点 P_2 の温度変化と一致するように接触部分の熱伝達係数 h_c を設定していることから、定常状態時の各種設定が重要であることを示している。すなわち、本 FEM 解析による熱刃のモデル化において、各種物性値や非接触部分（熱伝達係数 h_c 以外）の解析パラメータに対し適切な値を用いれば、様々な条件における接触部分の熱移動に対しても、それに相当する熱伝達係数 h_c を設定することによって、熱刃の熱的挙動を数値解析的に推測できることを示している。本検討を行った測定点 P_2 は、熱刃断面内において熱刃先端部から 6.85 mm の位置にあり、**Fig.5** の結果から考察すると、熱刃先端部分の温度変化についてもある程度模擬できていると推測できる。さらに、熱刃全体の温度分布についても、前述した昇温過程後の定常状態における結果から、熱刃先端部分と同様にある程度模擬できていると推測できる。このことから、実際の熱刃においては測定が困難な熱刃先端部付近や、熱刃全体の温度分布についても、**Fig.6** に示すとおり FEM を用いた本解析モデルにより、局所的かつ大局的な推定が可能となり、本手法は非常に有効な方法であると言える。ここで、**Fig.6(a)**、**(b)**

および**(c)**は、それぞれ接触過程開始からの時間経過 $t(s)$ に対する**(a)**熱刃先端温度の変化、および、**(b)** $t=0$ s における熱刃断面の温度分布をコンター図で示したものの、FEM 解析で使用した**(c)**熱刃先端付近におけるメッシュパターンである。ここで**(a)**の熱刃先端温度とは、**Fig.6 (c)**における刃先端 1 点の温度を示している。

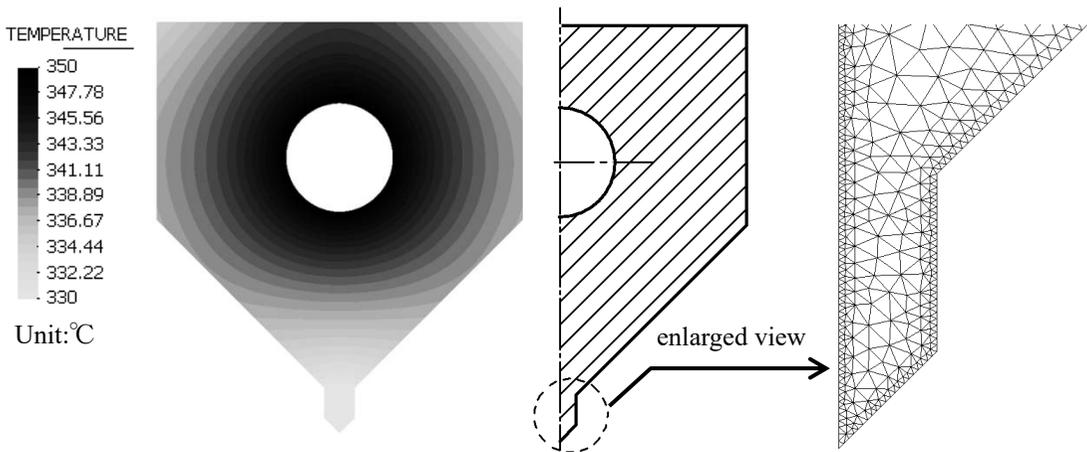
また、熱刃の物性値や熱刃外周の熱伝達係数に、それぞれ一般的に知られている数値や想定される環境における大体の値を利用し、接触面に対し仮想的な熱伝達係数を与え解析を行ったところ、**Fig.5** および **Fig.6** の結果と同様の傾向を示し、定性的評価は可能であることが分かった。

これらの結果から、例えば、熱刃外周における環境が変わらないとする仮定のもとで、同じ断面形状の熱刃に対し、ヒータ入力温度だけを変えた場合や熱刃材質だけを変えた場合などにおいて、熱刃の熱的挙動におよぼす影響について定性的あるいは定量的に検討することができるなど、サイドシール用熱刃設計における本手法の有用性は高いと言える。

以上、本研究においては、**Fig.3** に示すように 1 サイクル（接触過程および非接触過程）の熱刃の動きに対するモデル実験と FEM 解析結果の比較検討を行った。一方、実際の製造における熱刃は、例えば 1 分間に 100 サイクルの周期で製袋を行っている。これに対して、本研究において構築した FEM 解析モデルでは、上述した 1 サイクル分の工程を解析プログラムの中で繰り返すことにより対応可



(a) at the tip of heat cutter



(b) Temperature distribution in the cross section of the heat cutter ($t=0[s]$)

(c) Mesh pattern near the tip of heat cutter

Fig.6 Temperature change in the process to push a water absorbing paper (Finite element analysis results)

能である。今後、周期的工程における熱刃の熱的挙動に対し、本手法を用いてその推定・評価を行っていくが、その妥当性についても検討する必要がある。現在、実際の製袋工程における周期的に動作する熱刃に対し温度測定を行い、それを模擬した FEM 解析の結果をもとにその妥当性について検討を進めてい

る。

5. 結論

本研究では、製袋方法の一つであるサイドシール法で用いられる熱刃を対象に、その熱刃設計における FEM 解析の有効性について検討を行った。以下に得られた結論を示す。

(1) 定常状態における熱刃の温度測定結果と FEM 解析モデルの計算結果から、熱刃全外周面と周辺気体との間の熱伝達係数や各種熱刃物性値は、定量的な評価を行う上で重要なパラメータであり、物性値については温度依存性を考慮する必要がある。

(2) 熱刃先端部からの接触に伴う熱移動問題に対し、これを接触面における熱伝達問題と置き換え、その面に適当な熱伝達係数を設定することにより熱刃の熱的挙動を模擬できる。ただし、接触部以外の解析パラメータに対し妥当な設定を行うことが前提となる。

(3) 本 FEM 解析モデルにおける熱刃の物性値や熱刃外周の熱伝達係数などは、それぞれ一般的に知られている数値や想定される環境における大体の値を利用し、その上で接触面に対し仮想的な熱伝達係数を与えた場合は、熱刃の熱的挙動について定性的な評価が可能である。

(4) FEM 解析を用いることで、実際の熱刃において測定が困難な熱刃先端部付近や、熱刃全体の温度分布についても、局所的かつ大局的な推定が可能となり、熱刃設計において FEM 解析を用いることは非常に有効である。

以上、得られた結論を述べたが、今後の課題として、実際の製袋工程における周期的に動作する熱刃の熱的挙動に対し、本手法の妥当性について検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 橋本由美, 橋本静生, 山田和志, 濱田泰以, 日本包装学会誌, 21(2), 115-123(2012)
- 2) 橋本静生, 橋本由美, 山田和志, 濱田泰以, 日本包装学会誌, 22(3), 227-236(2013)
- 3) Tsuyoshi NISHIZAKA, Takeshi DOI, Hiroyuki SHIRAIWA, J. Pac. Sci. Tech. 24(6), 357-368(2015)
- 4) 日本機械学会, 伝熱工学資料改訂第 5 版, 285(2009)
- 5) 矢川元基, 宮崎則幸, ”有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析”, サイエンス社, p. 13(1985)

(原稿受付 2016年 10月 3日)

(審査受理 2017年 4月 6日)