

製袋用熱刃の熱的挙動に関する研究

(熱刃の数値解析モデルにおける各種パラメータの検討)

土井猛志・小村優・白岩寛之・竹下幸輝¹・西坂強²

Studies on Thermal Behavior of the Heat and Seal Cutter for Making Bags

(The Examination of Various Parameters in the Numerical Modeling of the Heat and Seal Cutter)

Takeshi DOI, Yu KOMURA, Hiroyuki SHIRAIWA, Kouki TAKESHITA¹ and Tsuyoshi NISHIZAKA²

(Received September 30, 2011)

Abstract In this research, in order to improve the strength of a side seal bag, thermal behavior of a heat and seal cutter for making bags is studied by way of experiment and numerical analysis. In our old measure, thermal behavior of a heat and seal cutter for making bags was considered by 2-dimensional non-steady heat conduction FE(finite element) analysis. In this result, however, effects of a heat pipe inserted into the cutter in the longitudinal direction on thermal behavior of the cutter were not become clear. In addition, validation of the 2-dimensional FE analysis result was needed because boundary conditions of the numerical analysis were set up ambiguously in part. And so their problems were considered by comparison between 3-dimensional non-steady heat conduction FE analysis results and experimental results. As a result, the importance that numerical values of thermodynamic properties (density, specific heat and coefficient of thermal conductivity) and boundary conditions on the region of a cutter tip are set up properly was ascertained. In addition, it was found that thermal behavior on the region of the cutter tip could be simulated sufficiently by the 2-dimensional FE analysis.

Keywords [Cutter, Side seal, Numerical analysis, Finite element analysis]

1 緒言

袋は古代から現代に至るまで人間の生活に欠かせない物として使用されている。古くは動物の胃袋などから始まり、土器などの瓶や植物を編んだものと進化していき、現在では紙製、布製、ビニール製など多種多様な材質や形状の袋が存在する。

中でもポリプロピレン製の袋が、その加工性の良さや強度の高さ、また安価で薄く軟質でありサイズも豊富などの理由から多用されている。またこのポリプロピレン製の袋にも様々な種類があり、用途によって分類され多方面で使用されている。

その製袋法の中から代表的なものとして、サイドシールという方法を取り上げることとした。サイドシールとは、二つ折りにしたフィルムを高温に熱した刃(熱刃)により溶断・溶着することで袋とするものである。

本研究では、このサイドシールによって製袋された袋の強度(シール強度)の向上と、ひげやピンホールなどの欠陥防止のために、熱刃の形状や材質、操業時の条件などの組み合わせについて検討し最適化を図る、すなわち、シールの加工速度や強度の向上を最終的な目標としている。

これまでの研究においては、有限要素法を用いた

1 三菱重工業株式会社

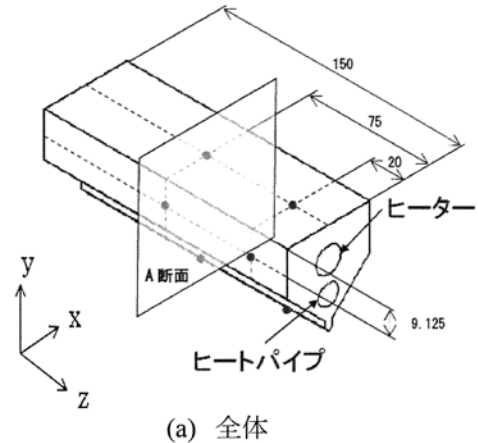
2 ユニードパック株式会社

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

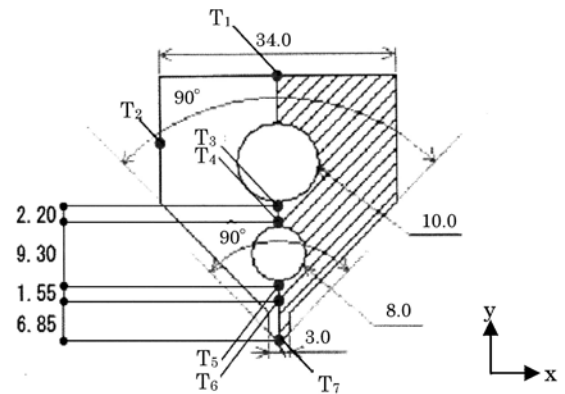
YUNIDOPACK Co., Ltd.

2次元非定常熱伝導解析を行い実作業時の温度測定結果と併せて熱刃の熱的挙動について考察を行ってきた^{1,2)}。しかしながら、今までの2次元解析では、長手方向のヒートパイプが熱刃にどのような影響を与えるのか不明確な上、各種解析パラメータ（物性値や境界条件等）中の一部において曖昧なモデル設定を行っていた。そこで試作熱刃を作成しそれを用いたモデル実験結果³⁾と照らし合わせながら、各種解析パラメータの検討を行うこととした。さらに、検討したパラメータを用いた3次元解析を行いヒートパイプの影響を明らかとし、かつ、これまで実施してきた2次元解析の妥当性について検討する。

また、前述したように、熱刃の挿入材を挿入なし(穴なし)、銅棒、ヒートパイプの3通りの解析を行う。



(a) 全体



(b) 2次元断面(A断面) (Unit: mm)

図1 実験で用いた熱刃

2 研究内容

2.1 試作熱刃の形状および寸法

図1に実験で用いた試作熱刃の形状および寸法を示す。熱刃の長手方向に対し、ヒーターおよびヒートパイプが挿入されている。図1(b)に示す熱刃長手方向中心「A断面」のT₁~T₇は温度測定位置を示す。また、図1(b)の斜線部は、2次元非定常熱伝導有限要素解析で用いた1/2モデル部を示す。

2.2 研究の流れ

図2に研究の流れを示す。図1(a)に示すヒートパイプ部について、ヒートパイプ以外の例として穴なしおよび銅棒についても検証を行う。その際、モデル実験と同様な結果になるように、各種パラメータ、例えば熱伝達係数などについては、3次元形状による3次元非定常熱伝導有限要素解析をそれぞれ行い決定する。その後、2次元解析を行い、前述の3次元解析結果との比較を行う。その結果をもとに、ヒートパイプの影響および2次元解析の妥当性について検討を行う。

3 数値解析

3.1 試作熱刃によるモデル実験について

実験の順序を抜粋すると以下のとおりである³⁾。

- (1) 幅70mmの吸水紙に十分に水を含ませる。
- (2) ヒーターを所定温度(350℃)に設定し、実験を開始する。
- (3) 20分経過後、吸水紙(厚さ0.5mm)を熱刃先端の中央付近に5秒間押し付けて離す。
- (4) その後、10分間実験を継続し、終了する。

本実験に対する数値解析を行うにあたり、本研究では熱刃先端付近の温度特性を得る目的から、熱刃が吸水紙に接触してから100秒間の範囲で解析する。

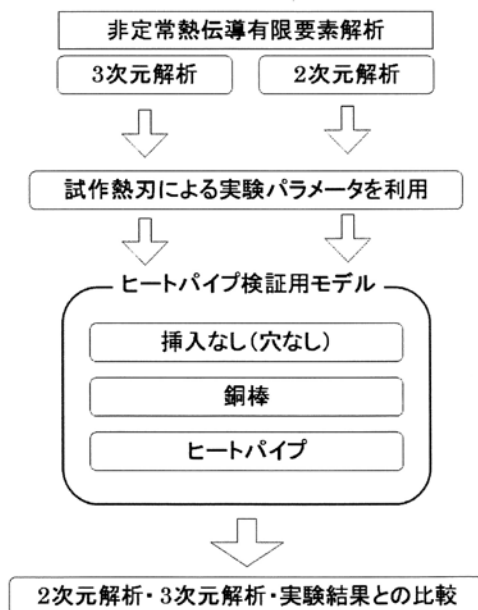


図2 研究の流れ

3.2 熱刃のモデル化について

熱刃断面のモデル及び観測位置を図3に、メッシュ(要素分割)を図4に示す。ここで、図3のA, B, Cはそれぞれ、図1(b)の T_7 , T_6 , T_1 に対応した観測位置である。

図4に示すように、熱刃先端付近の温度特性について検討を行う目的から、熱刃先端付近および挿入材周辺のメッシュを細かくした。

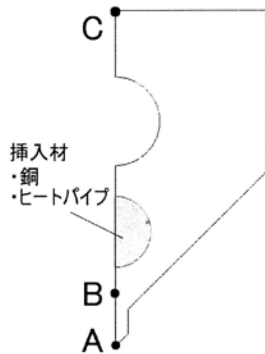


図3 熱刃断面の1/2モデル及び観測点

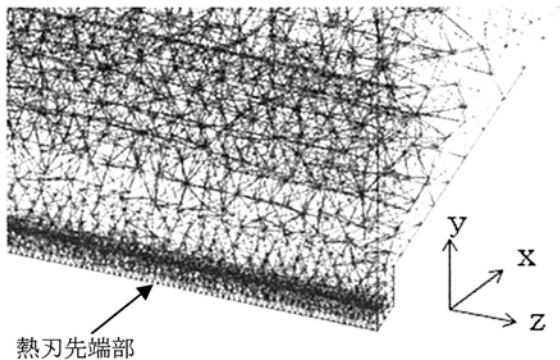


図4 解析に用いたメッシュのモデル (1/4モデル一部抜粋)

3.3 解析パラメータについて

熱刃の非定常熱伝導有限要素解析において必要となる主な解析パラメータを表1に示す。

表1 主な解析パラメータ

主な解析パラメータ		変更の有無
熱刃物性値	密度 [kg/m ³]	固定値
	比熱 [J/(kg·K)]	〃
	熱伝導率 [W/(m·K)]	〃
その他条件	熱刃初期温度 [°C]	〃
	外部温度 [°C]	〃
	解析終了時間 [s]	〃
	吸水紙に接触する時間 [s]	〃
	熱刃設定温度 [°C]	可変値
挿入材	密度 [kg/m ³]	〃
	比熱 [J/(kg·K)]	〃
	熱伝導率 X,Y [W/(m·K)]	〃
	〃 Z [W/(m·K)]	〃
熱刃先端	熱伝達係数 [W/(m ² ·K)]	〃

各種解析パラメータを決定していく際に、多数のパラメータ推定解析を行うが、表1に示すように一部のパラメータについて値を変えて解析を実施する。

3.4 挿入なし(穴なし)

まず始めに挿入なし(穴なし)で解析を行う。解析に用いた共通パラメータを表2(a)に、変更パラメータを表2(b)に示す。ここで、表2(a)の共通パラメータについては、以後の銅棒およびヒートパイプの際にも適用し、全解析における共通パラメータとする。熱刃の材質はSUS304である。

表2 解析に用いたパラメータ
(a) 共通パラメータ

熱刃物性値 (SUS304)	密度 [kg/m ³]	7798
	比熱 [J/(kg·K)]	590
	熱伝導率 [W/(m·K)]	19
その他条件	熱刃初期温度 [°C]	20
	外部温度 [°C]	20
	解析終了時間 [s]	100
	吸水紙に接触する時間 [s]	5

(b) 変更パラメータ：挿入なし(穴なし)

その他条件	熱刃設定温度 [°C]	350
挿入材	密度 [kg/m ³]	7798
	比熱 [J/(kg·K)]	590
	熱伝導率 X,Y [W/(m·K)]	19
	〃 Z [W/(m·K)]	19
熱刃先端	熱伝達係数 [W/(m ² ·K)]	24000

なお、熱刃先端部(吸水紙接触部)の熱伝達係数については、表3に示す実験結果をもとに、熱刃先端部の熱伝達係数を変えて解析した3点の結果から、測定開始温度及び最低温度(吸水紙に接触後、図3のB点が温度低下し最低温度を示した時点)が実験値と合うように外挿して求めた。銅棒とヒートパイプについても同様の方法で求めた。

表3 熱刃先端部の熱伝達係数の推定(外挿法)

		測定開始温度 [°C]	最低温度 [°C]
実験結果		335.4	272.9
解析結果	熱伝達係数 15000[W/(m ² ·K)]	333.5	278.1
	熱伝達係数 17500[W/(m ² ·K)]	333.5	276.5
	熱伝達係数 20000[W/(m ² ·K)]	333.5	275.2

挿入なしの実験結果および3次元・2次元解析結果について図5に示す。図5を見ると、各結果ともよく一致している。本結果から、これらで設定した各パラメータおよび境界条件の設定は適当であると考えられる。

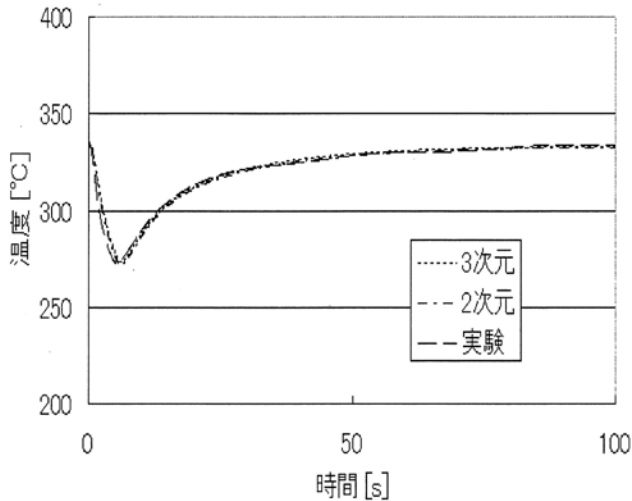


図5 実験結果と解析結果の比較 (穴なし)
(時間経過に対する B(T₆)点の温度変化)

3.5 銅棒

次に挿入材が銅棒の場合の解析を行う。変更したパラメータを表4に示す。

表4 変更パラメータ：銅棒

操業条件	熱刃設定温度 [°C]	345
挿入材	密度 [kg/m ³]	8960
	比熱 [J/(kg·K)]	383
	熱伝導率 X,Y [W/(m·K)]	9
	＼ Z [W/(m·K)]	386
熱刃先端	熱伝達係数 [W/(m ² ·K)]	53463

ここで、2次元解析では当然ながら長手方向の熱伝導率は存在しない。そのため、長手方向の熱伝導率考慮の有無が解析結果へ及ぼす影響について検討するために、2次元断面 (X, Y 方向) の熱伝導率に等価熱伝導率 (モデル実験で得られた値³⁾) を用いた場合と、長手方向の熱伝導率を考慮して挿入材本来の熱伝導率を用いた場合の解析を行った。ここでは、それぞれについて実験モデルの等価熱伝導率 9 [W/(m·K)] と銅の 386 [W/(m·K)] を入れて解析した。

銅棒の結果を図6に示す。図6を見ると、2次元解析結果の2つを比較したとき、9 [W/(m·K)] は

B(T₆)点の温度が大きく下がっている。これは、386 [W/(m·K)] と比べ、ヒーターから供給される熱が挿入材と母材との間の熱抵抗により熱伝導を阻害するため、最低温度が低くなったと判断できる。

さらに、3次元解析結果と2次元解析 9 [W/(m·K)] の結果を比較すると、ほぼ一致していることが分かる。また、3次元解析結果については、実験結果と比較的良く一致した結果となった。この3次元解析結果と2次元解析 9 [W/(m·K)] の結果がほぼ一致したことにより、挿入材として銅を用いた場合、挿入なし(穴なし)の場合と同様に2次元解析においても、実際に用いた材料の物性値を用い、かつ熱刃先端部の吸水紙接触による温度低下を適当な熱伝達係数でモデル化することにより、実験結果を比較的良く再現できることが分かった。さらにこれらの結果から、挿入材(銅)の場合においては、熱刃先端付近の温度低下に与える影響としては、X, Y 方向の熱伝導率に比べ長手方向 (Z 方向) の熱伝導率の影響は小さいことが解析上明らかとなった。

しかしながら、2次元解析 9 [W/(m·K)] の結果と比較すると3次元解析結果の最低温度は約 3.3°C 温度上昇していることから、この部分に長手方向の影響が少なからずあらわれていると推測され、2次元解析ではこの影響が多少無視される結果となっていると考えられる。

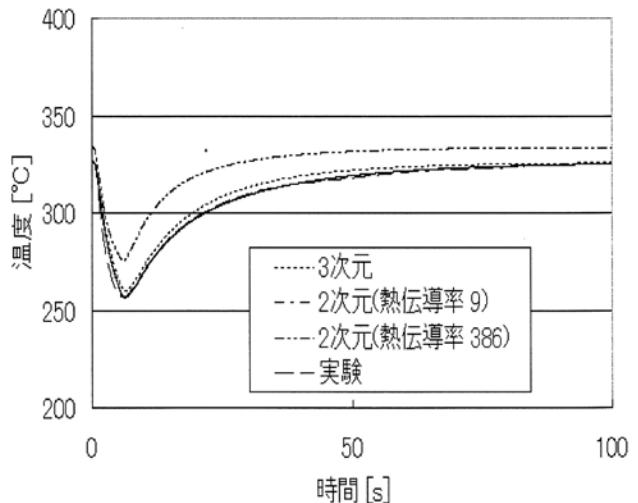


図6 実験結果と各解析結果の比較(銅棒)
(時間経過に対する B(T₆)点の温度変化)

3.6 ヒートパイプ

最後に、挿入材がヒートパイプの場合の解析を行う。変更したパラメータを表5に示す。ここでは、2次元解析における X, Y 方向の熱伝導率として、銅

棒の場合と同様に長手方向の熱伝導率考慮の有無が解析結果へ及ぼす影響について考察するために、実験によって得られた等価熱伝導率 $9 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ とヒートパイプの長手方向における熱伝導率 $38600 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ (銅の熱伝導率の 100 倍と仮定) を入れて解析した。また、ヒートパイプの密度については、ヒートパイプが複数の部材で構成される製品であることから、それらの平均密度を使用した。さらに、ヒートパイプの比熱については、作動流体にナフタレンを使用していることからその液体時における比熱を利用した。

表5 変更パラメータ：ヒートパイプ

作業条件	熱刃設定温度 [°C]	345
挿入材	密度 [kg/m ³]	2565
	比熱 [J/(kg·K)]	1817
	熱伝導率 X,Y [W/(m·K)]	9
	" Z [W/(m·K)]	38600
熱刃先端	熱伝達係数 [W/(m ² ·K)]	114000

ヒートパイプの結果を図7に示す。図7より、実験結果と2次元解析 $9 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ の結果は比較的よく一致している。しかし、3次元解析においては、穴なし及び銅棒と同様の方法で熱刃先端部における熱伝達係数を外挿し解析を行ったが、全く異なる結果となった。

そこで、さらに長手方向における熱伝導率の影響を見るため、これまでの熱伝導率 $38600 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ に対し、これを小さくした $386 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ に変更して3次元解析を行った。その結果を図8に示す。得られた結果は、仮定したヒートパイプの熱伝導率 (銅の熱伝導率の 100 倍) に比べかなり小さい値 (銅と同じ値) を使用したにも関わらず、温度低下の程度は実験結果にほぼ一致するものとなった。さらにこのことは、今回の解析条件のもとで数値解析的には、ヒートパイプの長手方向における熱伝導率が大きいほど熱刃先端付近の温度低下を抑制する傾向を示している。以下、この結果について考察を行う。

ヒートパイプについて計算を実施する際には、現状の仮定として、1)密度、2)比熱、3)長手方向の熱伝導率、および4)熱刃先端部の吸水紙接触に関する熱伝達係数があるが、前述の挿入なし(穴なし)および挿入材(銅棒)の場合においては、先の1)~3)については既知の物性値として計算が可能であり、それらを用いることで実験結果ともよく一致した。しかしながら、ヒートパイプの解析においては、1)~3)の物性値

を含めた適当なモデル設定が現状できていないと判断され、現在使用している 1)密度、2)比熱、3)長手方向の熱伝導率の値については、今後十分検討する必要があると考えられる。

そこで、1)~3)をパラメータとし多数の解析を実施してみたが、本研究では実験結果に良く一致するパラメータ値を得ることができなかった。これらの解析結果から、1)~3)のパラメータの中で、熱刃先端部の温度低下に最も影響を与えるものは、3)長手方向の熱伝導率であり、1)密度および2)比熱については、双方とも値を小さくすることで $B(T_0)$ 点の温度低下を助長する働きを示すが、その影響は3)と比較し小さいという傾向が得られた。今後1)密度、2)比熱、3)長手方向の熱伝導率を含めたヒートパイプそのもののモデル化についてさらに検討した上で慎重に考察する必要があると考えられる。

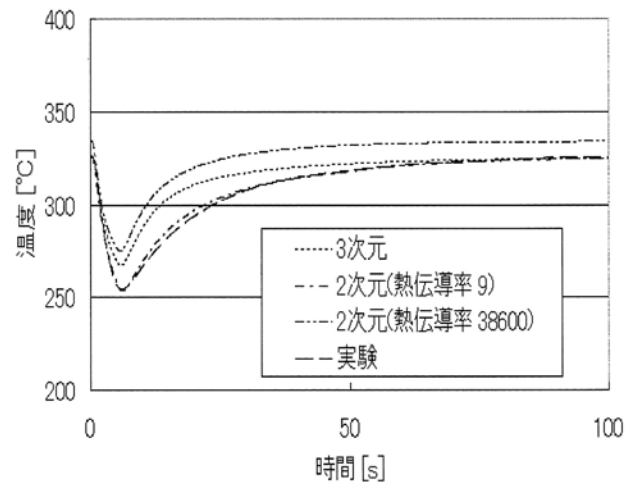


図7 実験結果と各解析結果の比較(ヒートパイプ) (時間経過に対する $B(T_0)$ 点の温度変化)

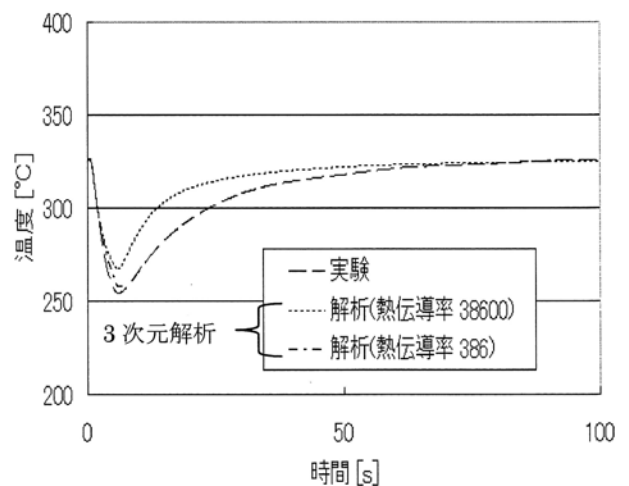


図8 熱伝導率を小さくした結果(ヒートパイプ) (時間経過に対する $B(T_0)$ 点の温度変化)

以上の結果から、挿入材としてヒートパイプを用いた場合、実際に用いたヒートパイプの物性値（密度、比熱、長手方向の熱伝導率）を把握し、かつ熱刃先端部の吸水紙接触に関する適当な熱伝達係数を設定した上で数値計算を実施することが重要であることが確認された。

しかしながら、図 7 から、実験によって得られた等価熱伝導率 $9 \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ を使用した 2 次元解析結果と実験結果が多少のずれはあるものの良く一致していることから、図 1(b) の 2 次元断面（A 断面）における熱刃先端付近の温度特性については、2 次元解析でも十分知ることができることが分かった。

また、2 つの結果の多少のずれは、銅棒の結果と同様に挿入材の長手方向における熱伝導率の影響が少なからずあらわれていると考えられる。

4 結言

- 1) 挿入なし(穴なし)および挿入材として銅棒を用いた場合は、実際に用いた材料の物性値を用い、かつ熱刃先端部の吸水紙接触による温度低下を適当な熱伝達係数でモデル化することにより、3 次元解析及び 2 次元解析双方とも実験結果を良く再現できることが分かった。よって物性値が既知のものについては、熱刃長手方向中心における熱刃先端部付近の温度特性に関して、2 次元解析でも十分予測可能だという結論に至った。
- 2) 挿入材としてヒートパイプを用いた場合、3 次元解析においては、実際に用いたヒートパイプの物性値（密度、比熱、長手方向の熱伝導率）を把握し、かつ熱刃先端部の吸水紙接触に関する適当な熱伝達係数を設定した上で数値計算を実施することが重要であることが確認された。
- 3) 挿入材としてヒートパイプを用いた場合、2 次元解析においては、密度については平均密度を、比熱については作動流体の液体時における比熱を利用し、かつ挿入材の熱伝導率として実験によって得られた解析対象断面の等価熱伝導率を使用することにより、熱刃長手方向中心における熱刃先端付近の温度特性について、2 次元解析でも十分知ることができる。
- 4) 2 次元解析においては、挿入材の長手方向における熱伝導率の影響を多少無視することになるが、熱刃長手方向中心における熱刃先端付近の温度変化について限られた範囲内では有効であり、熱刃の特性を把握する有用な手法であることが確認された。

謝辞

本研究は、平成 21 年度「高いシール強度を得るサイドシール方法の開発」に関連する共同研究であり、実験データ収集および論文の執筆にあたり、ユニードパック株式会社 西坂強様には、研究に関する様々なご指導・情報を賜り心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 濱村俊之輔, シール強度に及ぼす製袋時の熱刃挙動に関する研究, 第 14 回 高専シンポジウム in 高知 講演要旨集, p.152, 2009
- 2) 永峯征弥, シール強度に及ぼす諸因子の影響に関する研究, 第 16 回 高専シンポジウム in 米子 講演要旨集, p.9, 2011
- 3) 竹下幸輝, ヒートパイプを用いた製袋用熱刃の熱・温度特性, 都城工業高等専門学校平成 21 年度卒業論文, 2010