

論文

3Dプリンタにより作製した人工空洞付き 樹脂構造体に対する熱的探傷試験

倉橋 貴彦¹・丸岡 宏太郎²・井山 徹郎³

¹長岡技術科学大学 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

²長岡技術科学大学 (Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology)

³機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Nagaoka College)

Thermal Testing for Resin Structure Including Artificial Cavity
Made by Three-Dimensional Printer

Takahiko KURAHASHI¹, Kotaro MARUOKA² and Tetsuro IYAMA³

Abstract

In this study, the thermal testing is carried out by using the resin structure with artificial cavity made by three-dimensional printer. There are some non-destructive testing method such as the ultrasonic testing method, the thermal testing method and so on. It is known that the size of defect can be found at the target point by using the ultrasonic testing method. On the other hand, the thermal testing method has a characteristic that the location of the defect, the cavity, the corrosion and so on, can be found on the target surface. However, the shape of defect can't be correctly found by only using the heat image on target surface. Therefore, the purpose of this study is to construct a system that we can confirm the relationship between size of defect and the observed temperature data, i.e., the heat image and the time history of observed temperature data, by using the resin structure with artificial cavity. The resin structure is made by the three dimensional printer, and there is an advantage that the size and the shape of cavity can be changed freely by using the three dimensional printer.

Key Words : *thermal testing method, three-dimensional printer, artificial cavity*

1. 序論

非破壊検査手法としては、打音試験¹⁾や超音波探傷試験²⁾、渦電流探傷試験³⁾、熱的探傷試験⁴⁾等が挙げられる。実際に適用する場合、欠陥の深さや対象とする材料等に対して適切な方法を選定し、精度良く欠陥検出を行うことが望まれる。本研究では、熱的探傷試験に着目し、研究を行う。この試験法は、サーモグラフィによる熱画像から欠陥の有無を探傷

するものであり、面的に欠陥探傷を行うことのできる利点を持つ。図-1に構造体内部の中央に空洞を有する試料を下面から熱した場合の上面における熱画像の一例を示す。空洞外側に比べて、空洞上部の温度が高くなっており、試料内に空洞等の欠陥がある場合は、試料表面において温度が異なることがわかる。しかしながら、欠陥のサイズや深さにより、欠陥の検出が困難になることがある。そこで本研究では、空洞の形状を自由に変えて、熱的探傷試験の事

前検討を行うために、3Dプリンタにより作製した試料を用いて、熱的探傷試験を行う。また、将来的に、試料表面の温度を使って空洞の位置や形状を求める逆解析への発展を考え、数値シミュレーションによる検討も実施する。

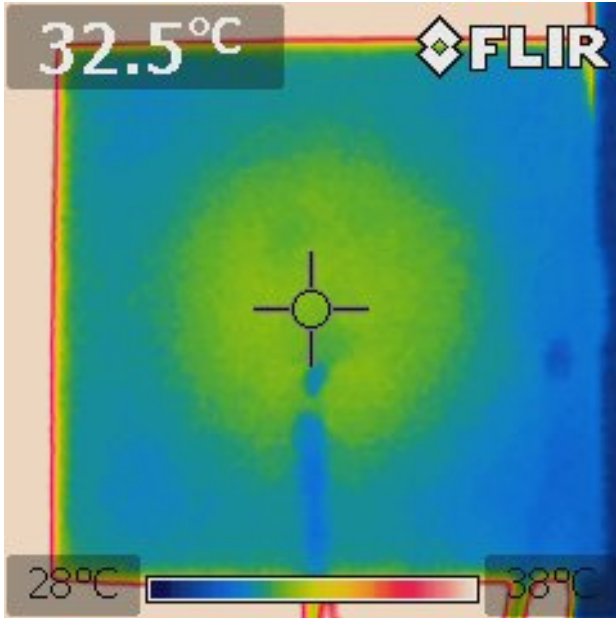


図-1 熱的探傷試験の様子

2. 試料作製に用いた3Dプリンタおよび試料の仕様について

まず、ソリッドワークスにより内部に空洞を有する3次元構造モデルの図面作成を行い、3Dプリンタによる試料の作製を行なう。図-2に本研究で用いた3Dプリンタ(Zortrax社製M200)を示す。造形方式は熱溶解積層方式(FDM方式)であり、最大造形サイズは200mm×200mm×200mm、最小積層ピッチは0.09mmである。造形物の寸法誤差はX、Y方向についてはおよそ±0.2mm、Z方向に±0.05mm程度で、本研究にて用いる試料の形状を造形するには十分な造形精度を有している。

また本研究で作成する試料の図面を図-3に示す。試料のサイズは幅100mm、奥行100mm、厚さ20mmであり、中央の楕円体の空洞は直径90mm、厚さ15mmである。試料の作製にあたって、造形材料はABS樹脂を採用し、0.19mmの積層ピッチで造形した。積層の方向は試料の長手方向とし、サポート材を用いない条件で造形を行った。



図-2 試料作製に用いた3Dプリンタ

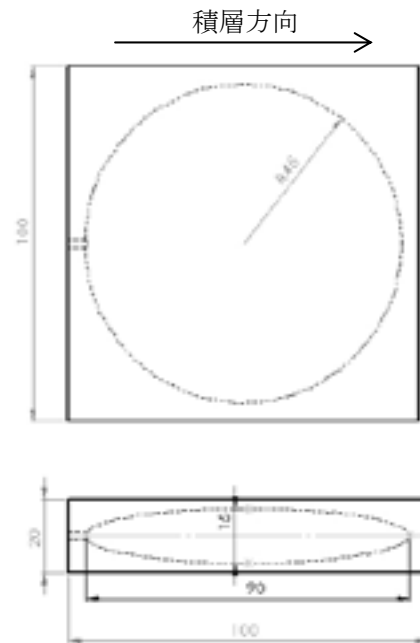


図-3 試料作成図面

3. 内部に空洞を有する樹脂構造体に対する熱的探傷試験

図-3に示す試料の空洞の形状を基準として、空洞の厚さが10mm,15mmの場合について熱的探傷試験を行った。実験の様子を図4に示す。図4の左側はホットプレートに乗せた試料、右側は熱電対を示す。図-4の様に、ホットプレートの左側に空洞ありの試料、右側に空洞なしの試料を2つ並べて、温度計測

の実験を行った。温度の測定点は図-5に示すとおりであり、空洞厚の厚い部分の上表面（Point A）と空洞厚の薄い部分の上表面（Point B）における温度履歴について測定を行った。

まず、楕円体の空洞厚さが15mmのモデルと空洞のないモデルについて、Point AおよびPoint Bのそれぞれの点における温度履歴の比較を行った。結果を図-6および図-7に示す。結果として、Point Bにおいては、温度履歴は空洞の有無に関わらず、それ程結果に違いは見受けられないが、Point Aにおいて、空洞の存在する場合は、空洞が無い場合に比べて同時刻における温度が高くなる傾向が得られた。これは、空洞の内部で温められた温度が空洞上面の温度を上昇させるため、結果として空洞上部の表面温度は空洞が無いモデルの結果に比べて、高い温度を示す結果になったものと考えられる。

同様の実験を空洞厚さが10mmのモデルと空洞のないモデルについて行い、Point AおよびPoint Bのそれぞれの点における温度履歴の比較を図-8および図-9に示す。結果としてPoint Aにおける空洞が有る場合と無い場合の温度差は、空洞厚さが厚いモデル（15mmのモデル）の場合に比べて、小さいことが見て取れる。このように、空洞の厚さの違いにより、試料表面における温度履歴に違いが生じることがわかる。

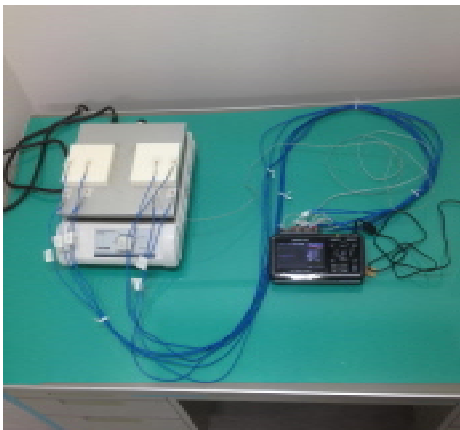


図-4 実験時の様子

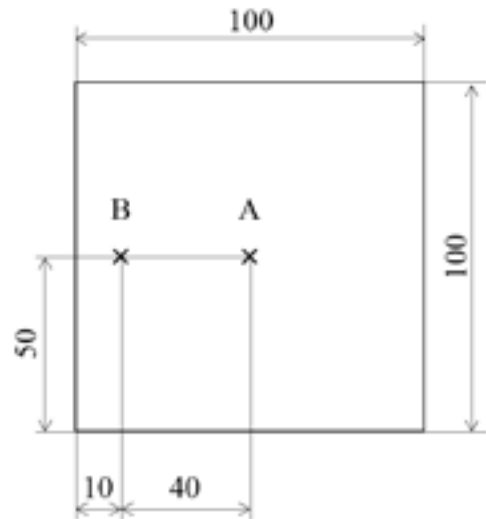


図-5 温度の測定点

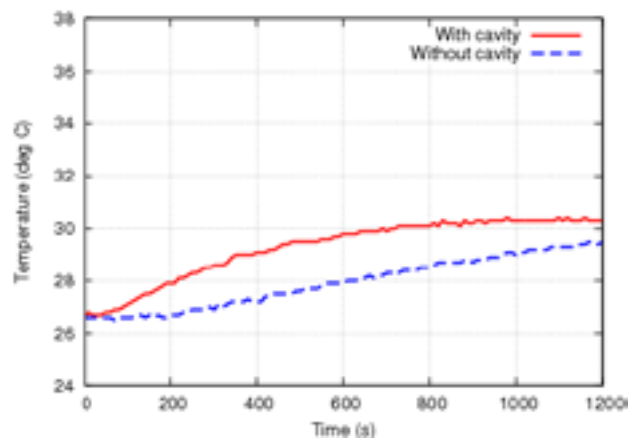


図-6 Point A における温度履歴の比較
(空洞厚さ 15mmモデル)

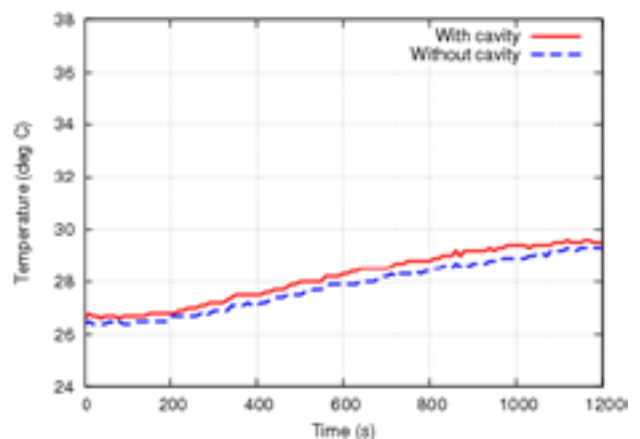


図-7 Point B における温度履歴の比較
(空洞厚さ 15mmモデル)

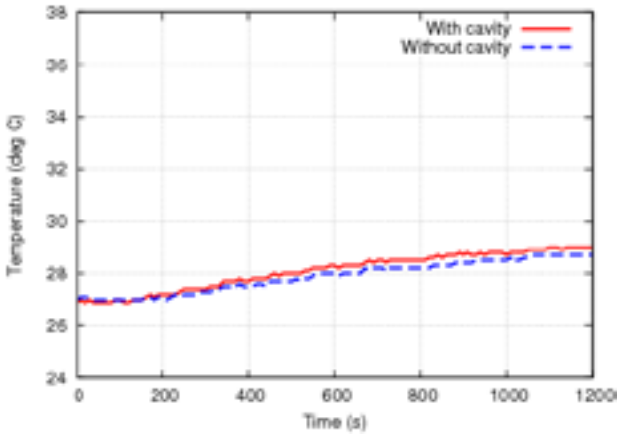


図-8 Point Aにおける温度履歴の比較
(空洞厚さ 10mm モデル)

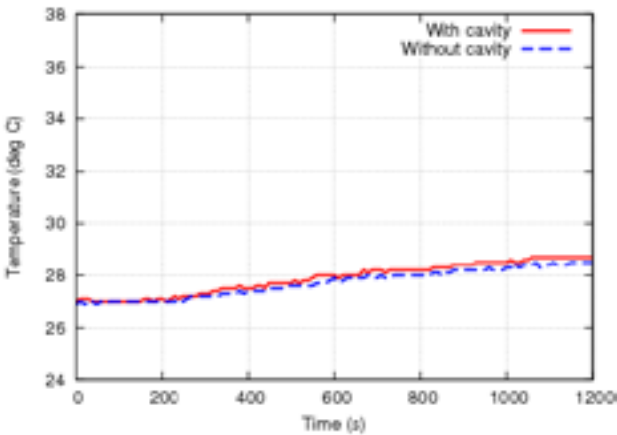


図-9 Point Bにおける温度履歴の比較
(空洞厚さ 10mm モデル)

4. 熱的探傷試験結果に対する再現シミュレーション

次に、前章において行った空洞厚さ15mmのモデルに対する試験の再現シミュレーションをSolid Works Simulationにより行った。時間増分量 Δt は10sとし、図-10、表-1に示す有限要素メッシュを用いる。試料全体の初期温度は299.6K(=26.6°C)とし、試料の材料(ABS)の熱的物性値は表-2に示す値を用いる。また、試料の外表面(試料下面も含む)および空洞の表面の熱伝達係数は表-3のように与え、外気に触れている部分の参照周囲温度は実験時の外気温とし、299.9K(=26.9°C)を与える。また、試料内部の空洞における参照周囲温度は試料内部で実験時に実測した温度(図-11)を与えることにする。また、試料下面の温度はホットプレート表面の実測温度(図-12)を参照周囲温度とした熱伝達条件として与えることにする。ホットプレート部分のメッシ

ュは実験時と同じ様子を示すために用意しただけであり、熱伝導の計算では解析から除外している。

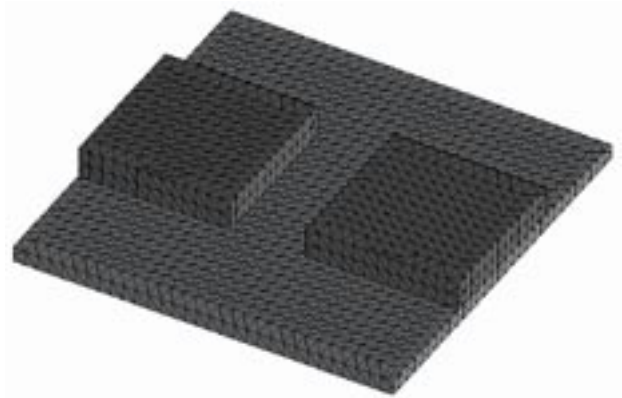


図-10 有限要素メッシュ図

表-1 メッシュ条件

	節点数	要素数
プレート	2,849	10,779
試料 空洞厚 15mm	878	2,628
試料 空洞無し	994	3,498

表-2 材料の熱的物性値

	密度 [g/cm ³]	比熱 [J/kg・K]	熱伝導率 [W/m・K]
ABS	0.75	1,386	0.2256

表-3 熱伝達率

	外表面 [W/m・K]	空洞表面 [W/m・K]
ABS	10.0	10.0

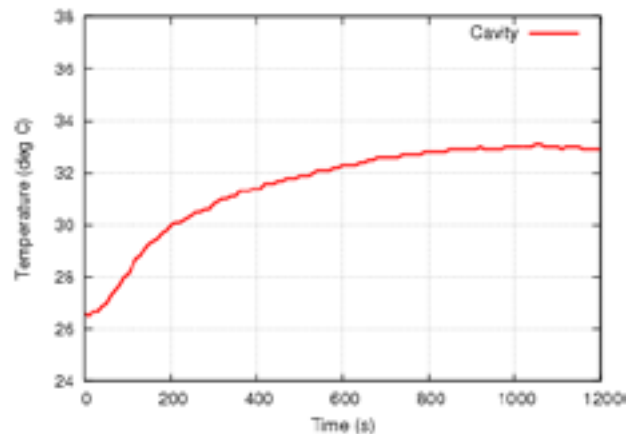


図-11 試料内の空洞中における温度履歴(実験時)

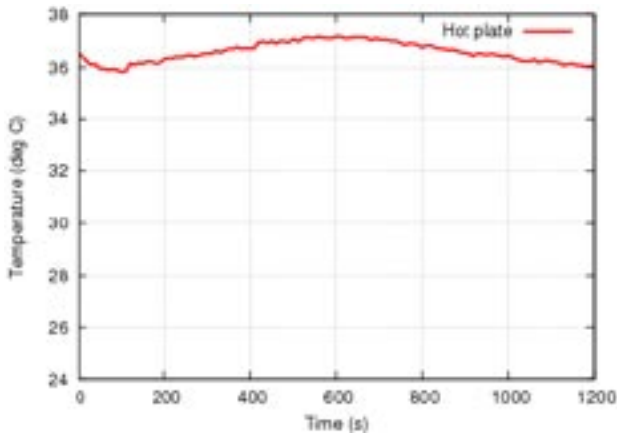


図-12 ホットプレート表面の温度履歴（実験時）

解析結果を以下に示す．図-13は $t=1000s$ における温度のコンター図を示しており，実験時に合わせて左側が空洞ありのモデル，右側が空洞なしのモデルとなっている．結果として，空洞ありのモデルの空洞上部上表面の温度は空洞なしのモデルに比べて，若干高い温度を示していることがわかる．またPoint A, Bにおける解析結果と実験結果の比較を図-14および図-15に示す．結果として，解析開始の始めの方は実験時における測定温度と良い一致を示しているが，解析後半の温度は実験結果と離れる結果となっていることがわかる．

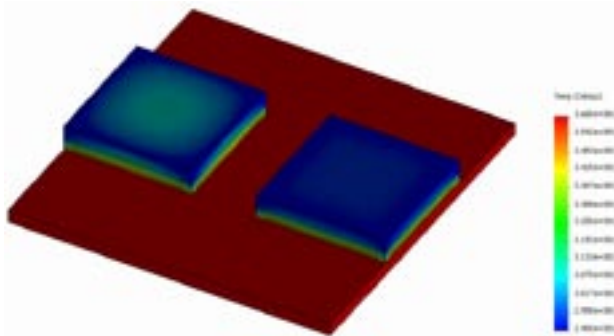


図-13 熱伝導解析の結果 ($t=1000s$ 後)
(左：空洞あり，右：空洞なし)

ここで，実際の試料の断面を見ると，格子状にABSが編み込まれる形で試料が作製されており，若干の隙間が存在することがわかる（図-16）．そこで，式(1)の評価関数を用いて，この試料内部の隙間の影響を考慮するため，熱伝導率および空洞表面の熱伝達率に関するパラメータ同定を行う．計測点AおよびBにおける解析結果を $\phi^{comput.}$ ，実験結果を $\phi^{obs.}$ とする．

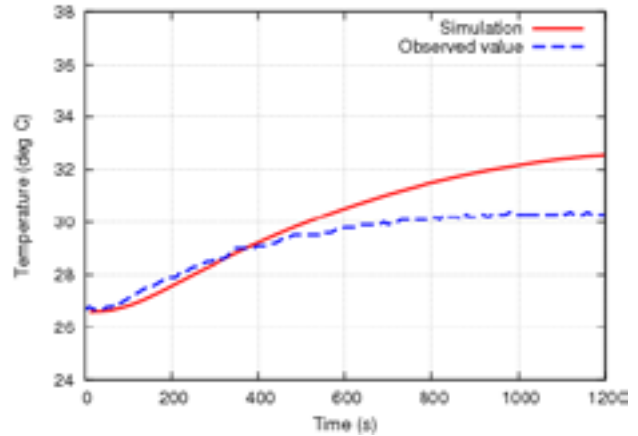


図-14 Point Aにおける温度履歴の比較
(空洞厚さ 15mmモデル)

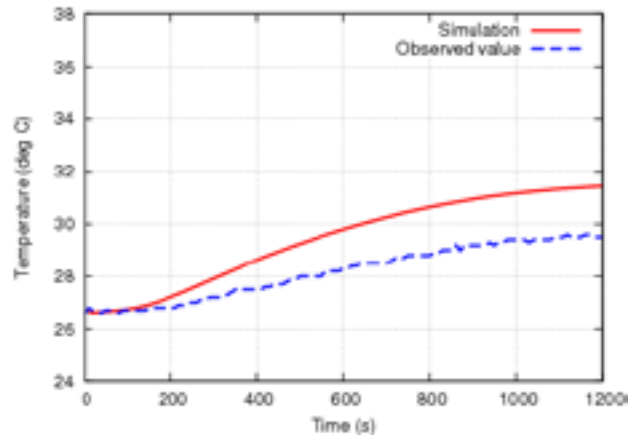


図-15 Point Bにおける温度履歴の比較
(空洞厚さ 15mmモデル)

$$J = \frac{1}{2} \int_{0s}^{1200s} (\phi_A^{comput.} - \phi_A^{obs.})^2 + (\phi_B^{comput.} - \phi_B^{obs.})^2 dt \quad (1)$$

評価関数の計算は台形則により行った．評価関数の値の比較図を図-17に示す．結果として，表-2に示す熱伝導率を $0.1354[W/m \cdot K]$ （表-2の熱伝導率を0.6倍した値），表-3に示す空洞表面の熱伝達率を $7[W/m^2 \cdot K]$ とした場合のPoint A, Bにおける解析結果と実験結果が最も一致する結果となった．Point A, Bにおける解析結果と実験結果の温度履歴の比較を図-18および図-19に示す．図より，Point Aにおいて解析結果と実験結果の間に若干の差はあるものの，両結果は良く一致していることがわかる．

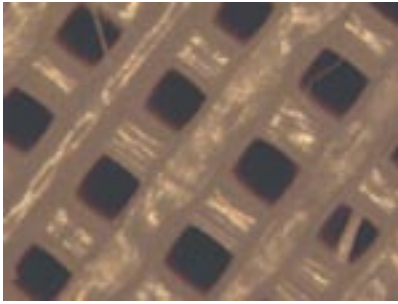


図-16 ABSの試料断面の拡大写真

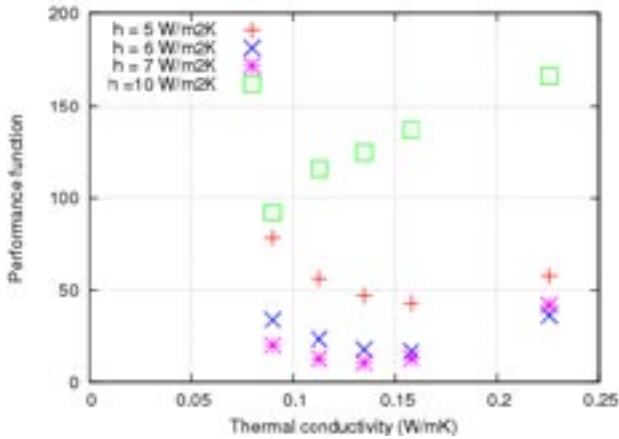


図-17 評価関数の熱伝導率および空洞表面の熱伝達率に対する変化

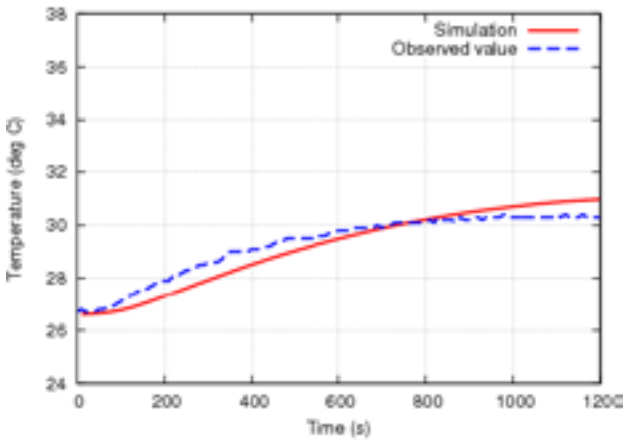


図-18 Point Aにおける温度履歴の比較 (空洞厚さ 15mm モデル：パラメータ同定後)

次に、パラメータ同定により得られたABSの熱伝導率および空洞表面の熱伝達率の妥当性を確認するために、空洞の厚さが10mmのモデル（表-4）に対して、実験および解析によるPoint AおよびPoint Bにおける温度履歴の比較を行う。ABSの熱伝導率および空洞表面の熱伝達率の同定を行ったため、表-5および表-6に本章で用いる試料ABSの熱的物性値および熱伝達率を再掲する。

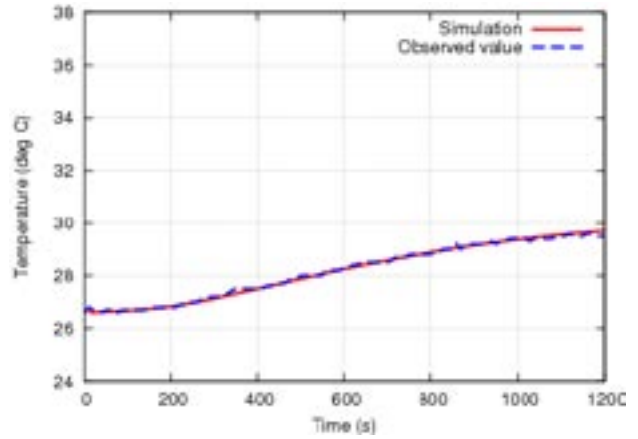


図-19 Point Bにおける温度履歴の比較 (空洞厚さ15mmモデル：パラメータ同定後)

表-4 メッシュ条件

	節点数	要素数
試料 空洞厚 10mm	888	2,694

表-5 材料の熱的物性値（熱伝導率の値を同定後）

	密度 [g/cm ³]	比熱 [J/kg・K]	熱伝導率 [W/m・K]
ABS	0.75	1,386	0.1354

表-6 熱伝達率

	外表面 [W/m・K]	空洞表面 [W/m・K]
ABS	10.0	7.0

解析結果と実験結果の比較を図-20および図-21に示す。結果として、同定した熱伝導率を適用することにより、解析結果と実験結果が良い一致を示していることがわかる。この結果より、同定した熱伝達率の値の確からしさを確認することができる。

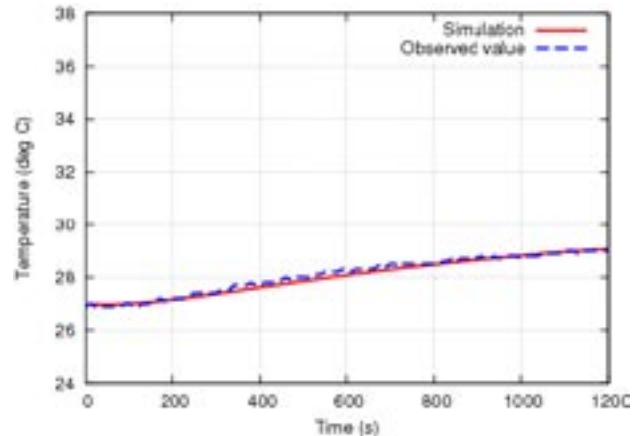


図-20 Point Aにおける温度履歴の比較 (空洞厚さ 10mm モデル)

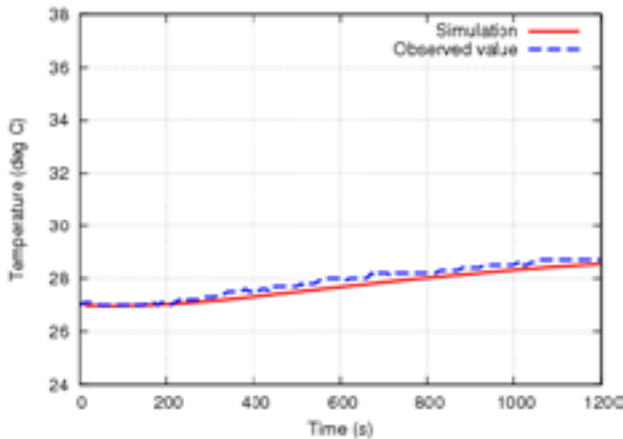


図-21 Point Bにおける温度履歴の比較
(空洞厚さ10mmモデル)

5. 結論

本研究では、3Dプリンタにより作製した空洞を有するABS試料に対して、熱的探傷試験の実験および解析を行った。実験の方では、空洞がある試料の場合、空洞がない場合に比べて、空洞の上部において温度が高くなる結果が得られた。また、解析においては、試料作製の精度も考慮するため、ABSの熱伝導率の同定を行った。結果として、通常のABSの熱伝導率より低めの熱伝導率を設定することで、実験と解析結果が同程度になることを確認できた。

将来の展望としては、空洞を自由に作ることでできる3Dプリンタの特性を活かし、試料内部の空洞形状の同定問題へ発展させることを考えている。実際には、空洞や試料内の欠陥の形状の詳細が不明な状態、あるいは作製できていても形状の凹凸が激しい場合等、欠陥の形状同定解析の検証としては結果の特性を把握しにくい場合が多い。そこで、本研究

のように、整形された試料内部の空洞を有するモデルに対して、空洞の形状同定解析を行うことで、解析プログラムにおいて改良すべき点を明らかにした上で、研究の実施が可能になるものと考えている。今後は、本研究において得られた知見をもとに、空洞の形状同定解析（逆解析）へ発展させることを考えている。

謝辞：本論文を執筆するにあたり長岡技術科学大学より「H27年度 高専－長岡技科大共同研究助成」および「次世代ものづくり技術の基盤となる超高信頼性材料創成事業」の援助を受けた。ここに謝意を表す。また、熱的探傷試験の実施に使用した機器の一部は、長岡工業高等専門学校 機械工学科 河田剛毅 教授より借用したものである。合わせてここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 磯光夫, 久保田和徳, 吉家賢吾, 畠中真一, 越後滋, 橘吉宏, "打音法による合成床版の非破壊検査手法に関する研究", 川田技報, Vol.27, pp.30-35, 2008.
- 2) 青山陽亮, "超音波探傷装置による鋼中マクロ介在物評価技術の開発", Sanyo Technical Report, Vol.21, pp.54-61, 2014.
- 3) 小井戸純司, 加藤修一, "内挿コイルを用いたパルス渦電流試験による強磁性伝熱管の探傷", 非破壊検査, Vol.61, No.7, pp.331-340, 2012.
- 4) 倉橋貴彦, 大下英吉, "コンクリート表面における実計測温度を用いた部分腐食領域を有する鉄筋コンクリートに対する鉄筋腐食形状の推定問題", 日本応用数理学会論文誌, Vol.23, No.3, pp.25-44, 2011.

(2015. 9. 17 受付)