

溶融積層式ラピッドプロトタイピング法により 作製したポリカーボネート樹脂製造形物の機械的性質

Mechanical Properties of Polycarbonate Prototype Models Produced by Fused Deposition Modeling Method

吉川 忠作* 菊池 武士* 奥村 俊彦*
Chyusaku Yoshikawa Takehito Kikuchi Toshihiko Okumura

(2005年6月1日 受理)

Polycarbonate (PC) prototype models produced by fused deposition modeling (FDM) method are adopted for actual parts and test parts. The FDM rapid prototyping (RP) models have anisotropic and inhomogeneous characteristics resulting from the modeling scheme. This investigation studied the effect of the prototyping direction and the specimen thickness on the mechanical properties of FDM models for PC. The prototyping direction demonstrably influenced the mechanical properties of FDM models. The thickness showed a slight influence. Adopting structural analysis software, mechanical responses of box-shaped models made by FDM and injection molding were investigated to estimate mechanical properties of final products using prototype models.

キーワード：ラピッドプロトタイピング、溶融積層式、ポリカーボネート、機械的性質、異方性、不均質性、CAD、CAE、線形構造解析、射出成形

1. はじめに

ラピッドプロトタイピング(Rapid Prototyping, 以下, RP)は、『短時間で試作品を造形する技術』であり, 工具や金型を用いることなく, 3次元CADのデータから試作品を自動造形することが可能である。CAD/CAEではコンピュータ画面上での検討に対して, RPでは, 実物(試作物)によるデザインや機能などの検討が可能である。

RPの造形原理は, ①光造形法, ②溶融積層法, ③粉末焼結法, ④薄膜積層法, ⑤インクジェット積層法, など各種存在し, それぞれの特徴を生かした用途に利用されている¹⁾。溶融積層法(Fused Deposition Modeling, 以下, FDM)は, 熱可塑性樹脂製の試作物を造形できるため, プラスチック製品の機械的性質予測への適用

が試行されている。しかし, FDM造形物は, 造形原理に起因する諸特性の方向性²⁾と不均質性を有するため, 同一形状の射出成形品とは機械的性質に差異が生じる。

本報では, ポリカーボネート樹脂(以下, PC)製のFDM造形物の機械的性質に関して, 試験片形状(3種類の造形方向および3種類の厚さ)および箱形状について射出成形品と比較した結果について報告する。

2. 実験方法

(1) サンプル作製

(A) FDMの造形原理と造形物の構造

FDMの造形工程は次のとおりである。

- (i) 3次元CADの形状データをもとに, 積層方向に輪切りにした造形用データの作成。
- (ii) 最下層から順に各層を積層して試作物を造形。

* 機械金属部 加工成形系

各層の造形は、モデル材料を加熱したノズルから押し出し、固化させる原理であり、(ii)の工程はモデル材料のアニーリング温度環境で行う。図1に示す各層の造形経路(ツールパス)は、まず断面の外側の輪郭を、次にその内部をある傾きで敷きつめる順序で行う。また、内部の経路の傾きは各層ごとに直交させる。

この造形原理のために、FDM造形物には、積層方向による異方性および表面と内部の構造差による不均質性が生じる。3次元形状に対する造形方向は、任意に設定可能であるため、これらの性質は、同一形状のFDM造形物であっても、造形方向により変化する。

(B) 試験片形状

JIS K7113, JIS K7171, JIS K7111 に基づくPC製の引張試験片(JIS 1号)、曲げ試験片(幅10mm)、シャルピー衝撃試験片(幅10mm)を次のように作製した。

射出成形試験片は、射出成形機(TUPARL TR80S2A(株)ソディックプラスチック製)[型締力:80ton, スクリュー直径:32mm]により、レキサ HF1110(GE Plastics社製)を用いて、樹脂温度:270℃, 金型温度:80℃の条件で射出成形し、試験前にアニーリング処理(90℃, 3時間)を行った。

FDM造形は、図2に示す3種の造形方向(A, B, C)、3種の厚さ(2.5, 4.0, 5.5mm)の試験片を、FDM RP装置(FDM TITAN Stratasys社製)[ノズル直径:0.4mm, 積層ピッチ:0.25mm]により、メーカー指定のPC材料を用いて造形した。

(C) 箱形状

図3に示すような、圧縮試験に供する箱形状(100×60×40mm)の射出成形品(以下、IMBX)とFDM造形品(以下、RPBX)のサンプルを次のように作製した。

IMBX(厚さ1.2mm)は、射出成形機(IS100EN 東芝機械(株)製)[型締力:100ton, スクリュー直径:36mm]により、レキサ HF1110(GE Plastics社製)を使用し、樹脂温度:270℃, 金型温度:80℃, ダイレクトゲートの条件で射出成形した。

RPBX(厚さ1.5mm)は、FDM RP装置(FDM TITAN Stratasys社製)[ノズル直径:0.4mm, 積層ピッチ:0.25mm]により、メーカー指定PC材料を使用して造形した。RPBXの厚さは、造形時の内部ツールパス(図1参照)を形成するために厚さ1.5mmとした。また、RPBXの積層方向は図3に示している。

(2) 試験方法

(A) 試験装置

すべての試験は万能材料試験装置(5583型INSTRON社製)を用いて、温度23±1℃, 湿度50±%の環境で行った。

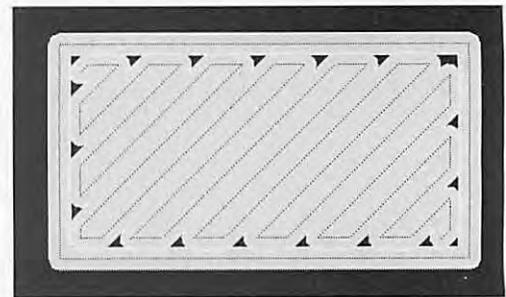


図1 ツールパス (破線: 中心線)

Tool path of FDM process
Dotted line: Center line of the path

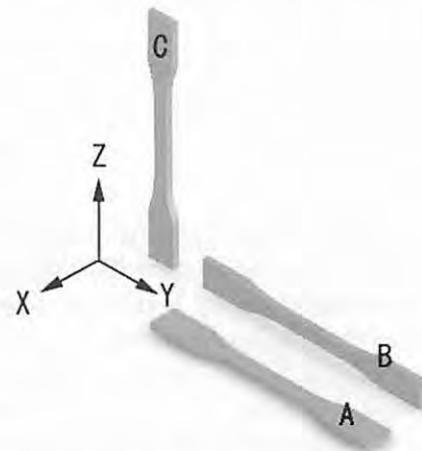


図2 造形方向の名称 (A, B, C) [Z: 積層方向]
Prototyping direction (A, B, C) [Z: layering direction]

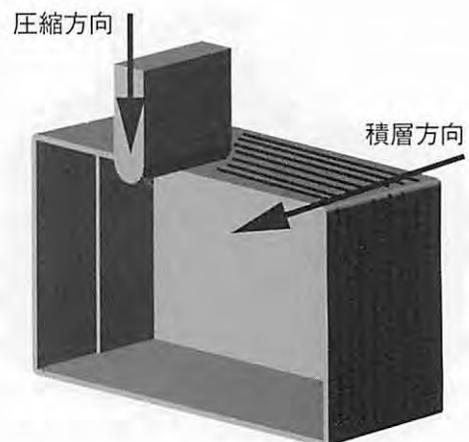


図3 箱形状に対する圧縮試験の模式図

Schematic description of compressive test for the box shape sample

(B) 試験片形状サンプルの試験

FDM造形物と射出成形品の試験片形状サンプルの引張試験, 曲げ試験, シャルピー衝撃試験はJIS K7113, JIS K7171, JIS K7111 に準じて行った。

(C) 箱形状サンプルの変形試験

RPBX とIMBX の圧縮試験(図3)は、圧子(直径10mm)と箱側面の接触長を箱高さ(40mm)の1/3(13mm)、箱の固定は前後左右に金属ブロックを配置して行い、変形量と圧縮荷重を測定した。

3. 結果と考察

(1) 試験片形状サンプルの試験結果

引張、曲げ、シャルピー衝撃試験の結果をそれぞれ図4から図7に示す。射出成形品の結果は、厚さ依存性は無視できるものとして、破線で示した。凡例名は、例えばFDM-Aは、造形方向AのFDM造形物試験片を表す。

すべての強度および曲げ弾性率の結果において、FDM造形物は射出成形品よりも低い値を示している。また、造形方向A, B, Cの値の順序および厚さによる値の変化から、FDM造形サンプルの機械的性質への造形方向の影響は一定ではなく、また、厚さの影響も一定でないことがわかる。

図4より、引張強度はFDM-Cの値が最も低く、射出成形品の約40%である。FDM-Cの引張試験においては、積層面の法線方向に負荷するため、積層界面の接合強度が表れているものと考えられる。

図5より、曲げ強度はFDM-AおよびFDM-Cが低く、射出成形品の60~70%程度である。

曲げ弾性率は図6のように、FDM-B, FDM-C, FDM-Aの順に低下し、FDM-Aの値は射出成形品の約60%である。曲げ強度および曲げ弾性率においては、FDM-Bが最も高い値を示し、射出成形品の80%程度である。

図7より、FDM造形品のシャルピー衝撃強度は、射出成形品の5~20%程度である。特にFDM-Cの衝撃強度は1.0kJ/m²と非常に小さい。この原因は、FDM-C試験片では、積層面に対して平行方向に衝撃力が加わり、積層の境界面に沿って亀裂が容易に進展するためと考えられる。

厚さ依存性については、FDM-Aのシャルピー衝撃強度(図7)が、厚さ2.5mmで最大値を示している。この点については、再現性を確認しており、その理由としては、今回は詳細に調査を行っていないが、厚さ方向の両端層の耐衝撃特性が高い可能性が考えられる。その他の結果においては、厚さによる値の変化は5%以下であり、かつ、変化の傾向が一定でないことがわかる。

図8から図10に引張、曲げ、シャルピー衝撃試験に

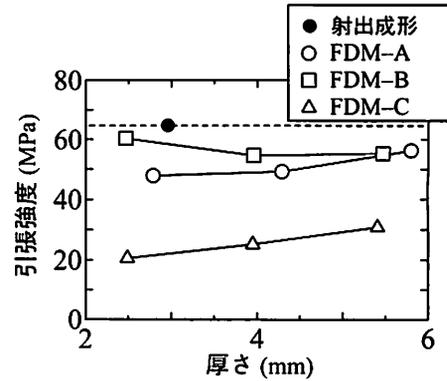


図4 引張強度の造形方向, 厚さ依存性
Tensile strength vs. thickness

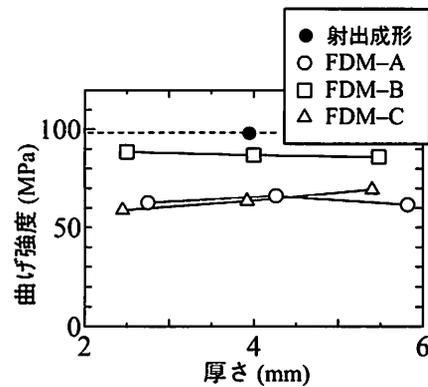


図5 曲げ強度の造形方向, 厚さ依存性
Flexural strength vs. thickness

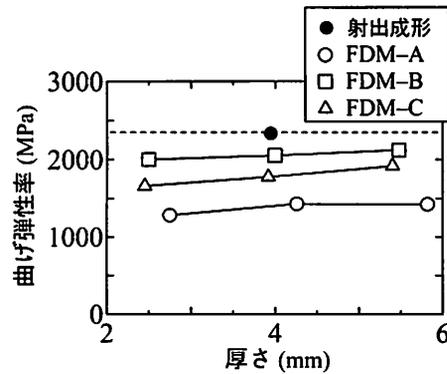


図6 曲げ弾性率の造形方向, 厚さ依存性
Flexural modulus vs. thickness

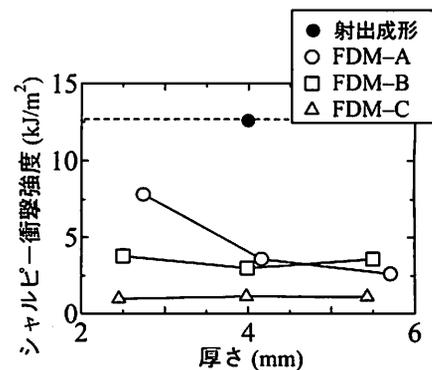


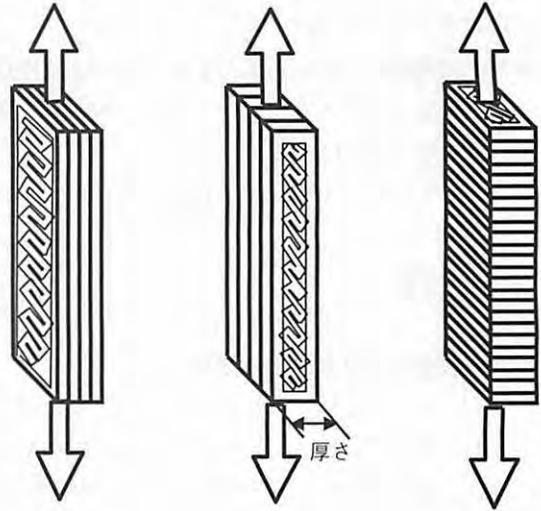
図7 シャルピー衝撃強度の造形方向, 厚さ依存性
Charpy impact strength vs. thickness

における各造形方向サンプルの構造を模式的に示す。また、FDM造形サンプルの外観を図11に示す。図8から図11において縞状に表れる造形時の積層界面の反復構造（ピッチ0.25mm）と荷重方向との関係、ならびに、試験片断面における外周部と内部の構造の差異（図1）が、造形方向による機械的性質の変化に影響を与えているものと考えられる。

FDM造形物の機械的性質を調査した結果、造形方向による機械的性質の変化は大きく、積層界面の接合力の低さが反映されると考えられた。特に、衝撃値が射出成形品の5~20%程度と非常に低く、FDM造形品を用いて射出成形品の強度を推定する際に、特に考慮する必要がある。

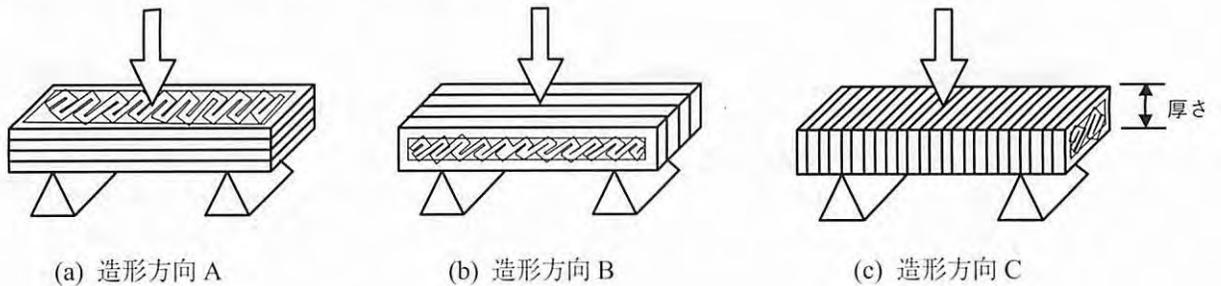
(2) 箱形状サンプルの変形試験

箱形状サンプルの圧縮荷重と変位の関係を図12に示す。凡例名のEXPは実験結果、CAEは線形構造解



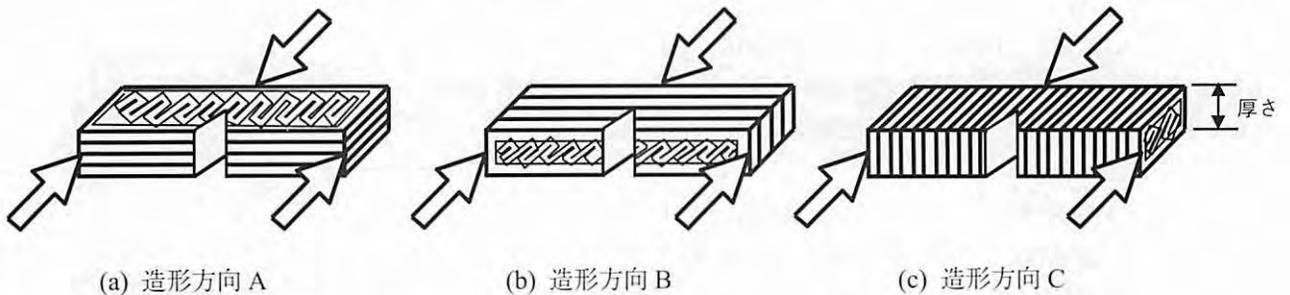
(a) 造形方向 A (b) 造形方向 B (c) 造形方向 C

図8 引張試験におけるFDMサンプルの構造 Structures of FDM samples in the tensile tests



(a) 造形方向 A (b) 造形方向 B (c) 造形方向 C

図9 曲げ試験におけるFDMサンプルの構造 Structures of FDM samples in the flexural tests



(a) 造形方向 A (b) 造形方向 B (c) 造形方向 C

図10 衝撃試験におけるFDMサンプルの構造 Structures of FDM samples in the Charpy impact tests

析の結果を表す。2(1)(C)項で記述したように、射出成形品とFDM造形品の厚さが異なるために、CAE解析によりRPBXの特性値を用いた厚さ1.2mm形状の結果を求め、CAE-RPBX(1.2mm)として示している。

CAE解析は、線形構造解析ソフトDesignSpace[ANSYS社製]を使用し、2次テトラ要素(要素数4000)、底面を完全固定、圧子と箱の接触は固着条件として行った。また、PC材料の特性値として、ポアソン比:0.4、比重:1.2を用いた。CAE解析結果(圧縮方向変形量分布)の例を図13に示す。ただし、線形構造解析

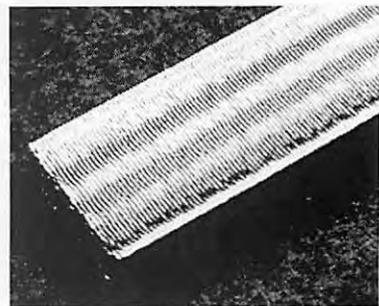


図11 曲げ試験サンプルの外観 (FDM-C: 幅10mm, 厚さ4mm) Appearance of a flexural test sample

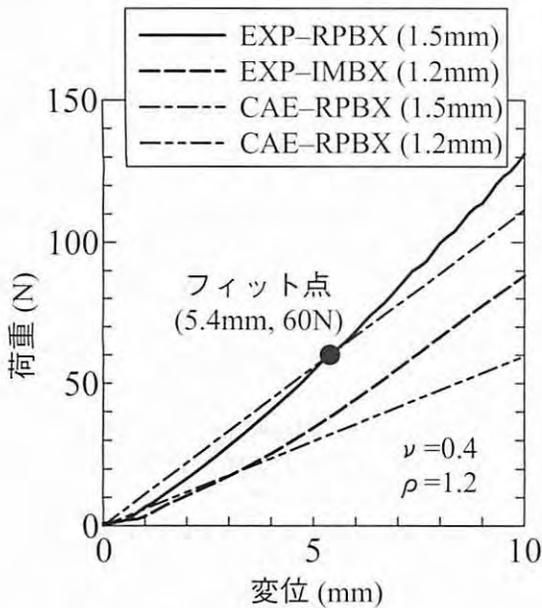


図 12 箱形状サンプルの圧縮荷重—変位の関係

Compressive load vs. displacement (box shape sample)

RPBX: box shape sample made by FDM RP
 IMBX: box shape sample made by injection molding
 EXP: experimental results
 CAE: results of linear structural analysis

の制限から、材料非線形、大変形については考慮していない。その結果、本解析においては、同一形状について、最大変位量は弾性係数および荷重にほぼ比例した応答を示し、変形の形態や分布に大きな変化は生じない。このことから、次のような CAE 手法をとった。

(i) 厚さ 1.5mm の箱形状に対する CAE 解析結果を RPBX 荷重応答の結果にフィットするよう補正弾性係数を決定。[ここでは、変位 5.4mm、荷重 60N にてフィット (図 12 中の点●)、補正 RP (厚さ 1.5mm) 弾性係数: $E_{RP(1.5)} = 1010\text{MPa}$]

(ii) 厚さ 1.2mm の箱形状に対して $E_{RP(1.5)}$ を使用した CAE 解析。

図 12 の破線: EXP-IMBX (1.2mm) と二点鎖線: CAE-RPBX (1.2mm) の差異は大きく、線形構造解析に起因する直線的な線形応答と実験結果の曲線的な非線形応答の差はあるが、複雑形状の製品の荷重応答には、FDM 造形物による性能試験では、正確な予測が困難であることがわかる。そのため、次のような RP/CAE 連携手法を試みた。

(i) 補正弾性係数を前記と同じ手法で決定。

(ii) FDM-B と射出成形品の曲げ弾性率の関係 (図 6) から射出成形品の弾性係数を推定。[ここでは、 $E_{IM} / E_{RP(1.5)} = 2400/2000$ より、射出成形品弾性係数: $E_{IM} = 1210\text{MPa}$]



図 13 線形構造解析の結果 (圧縮方向変形量)

Results of linear structural analysis (compress direction displacement)

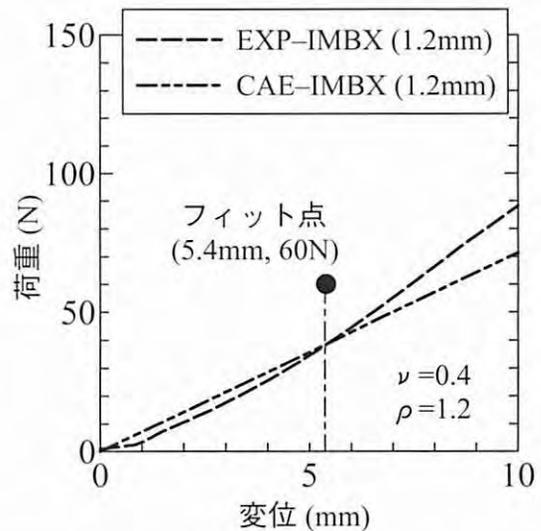


図 14 箱形状サンプルの圧縮荷重—変位の関係 (RP/CAE 連携)

Compressive load vs. displacement (box shape sample)

CAE-IMBX: CAE results using modified elastic modulus

(iii) 厚さ 1.2mm の箱形状に対して射出成形品弾性係数 E_{IM} を使用した CAE 解析。

図 14 に RP/CAE 連携による解析結果 CAE-IMBX を IMBX 試験結果 (EXP-IMBX) と比較して示す。実験結果と CAE 解析結果を比較すると、曲線と直線的一致は困難ではあるが、フィット点の変位を中心に射出成形品の荷重応答を CAE 解析が良い精度で予測していることがわかる。

FDM 造形物と CAE 解析の連携利用について検討した結果、FDM 造形物に対する性能試験のみではなく、FDM 造形物と射出成形品の特性比較の結果を、CAE

解析の材料特性に利用することで、射出成形品の機械的性質の予測精度が向上することを確認した。

5. まとめ

FDM 造形物および射出成形で作製した試験片の引張、曲げ、シャルピー衝撃試験を行った結果、次のことが明らかとなった。

FDM 造形物では

- (i) 造形方向による機械的性質の変化は大きく、表面の層構造の方向性が反映される。
- (ii) 試験片の厚さ依存性は 2.5~5.5mm の範囲においては小さい。
- (iii) 衝撃強度は射出成形品の 5~20% に低下する。
箱形状の FDM 造形物と射出成形品の圧縮荷重応答

の比較から、複雑形状においては FDM 造形物による性能試験のみでは機械的性質の正確な予測は困難である。さらに、FDM 造形物に対する性能試験の結果と、試験片形状での FDM 造形物と射出成形品の特性比較の結果を、CAE 解析の材料特性に連携して利用することで、射出成形品の機械的性質の予測精度を向上できる。

参考文献

- 1) 例えば、今村正人ら：型技術, 16, 10 (2001) p.17
- 2) Nicole H, Jeffrey N: SPE ANTEC, 1 (2001) p.964
- 3) 吉川忠作, 菊池武士, 奥村俊彦：プラスチック成形加工学会第 11 回秋季大会講演予稿集 (2003) p.357
- 4) 菊池武士, 吉川忠作, 奥村俊彦：プラスチック成形加工学会第 15 回年次大会講演予稿集 (2004) p.499