

# X線CTによるプラスチックリサイクル建材の内部解析事例

## Example of Internal Analysis of Plastic Recycled Materials using X-ray CT

谷岡晃和

Akikazu Tanioka

電子・有機素材研究所 有機・発酵担当

廃プラスチックを原材料に製造されているプラスチックリサイクル建材の製造、使用が各所で進んでいる。今後のプラスチックリサイクル建材製品の高機能化等を見据えて、製品内部の空隙の観察・分析を進めていく必要がある。今回、マイクロフォーカスX線CT装置（以下、「X線CT装置」）による製品内部の観察、解析を試み、それらが可能であることを確認した。また、製品の使用時、製品にかかる荷重が内部にどのような影響を与えているか確認するため、載荷され、破壊に至るまでの試料内部の変形挙動についてもX線CT装置による観察を試み、載荷時の変形挙動と破壊に至る状況について観察することができた。

### 1. はじめに

持続可能な循環型社会構築に向けてプラスチックリサイクルが進められている。マテリアルリサイクルの一環として、廃プラスチックを原材料とした建材である“プラスチックリサイクル建材”が製造されている。製品のうち板材、角材、丸棒等はデッキ材やフェンス、ベンチ、敷板等の屋外用途の資材として利用されている。プラスチックリサイクルが進むにつれ、プラスチックリサイクル建材は今後、他材料との複合化、生分解性付与等の高度化、高機能化の方向へ進展することが予想される。

それら新展開へ向かうには、現行の製造方法により製造されている製品の性状、物性について、確固たるデータを蓄積しておく必要がある。特に、製品内部に生じる空隙は製品の物性に大きく影響を与えるため、その形状、分布等について詳細な把握が求められる。しかしながら、これまでの建材製品内部の空隙分析は、試料切断面の観察によるものが多く、回転刃物等による切断では切断面の樹脂が溶融するなどして、適切な試料作製、観察が困難であるとともに、操作が煩雑であった。

一方、機械金属、電気電子分野において非破壊検

査では、従来よりマイクロフォーカスX線CT装置（以下、「X線CT装置」）による内部の欠陥解析等が行われており、木材、建材等の内部解析への同装置の活用も図られるようになっている<sup>2,3)</sup>。

今回、プラスチックリサイクル建材内部の空隙形状と分布を非破壊かつ三次元的に観察、分析するためX線CT装置を用いた観察、分析を行った。また、製品の使用時、製品にかかる荷重が内部にどのような影響を与えているか確認するため、載荷され、破壊に至るまでの試料内部の変形挙動についてもX線CT装置により観察を行った。載荷による変形挙動については、製品内部に大きな欠損（空隙）を有する場合を想定し、試料に貫通穴をあけた試料についても観察を行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 観察試料

使用済みポリプロピレン製品を原材料として成形、内部発泡等を経て製造されたプラスチックリサイクル建材製品を観察試料とした。同製品は成形時に生ずる製品表面のヒケが、劣化した木材表面に似た形状を呈することと、広葉樹材と同程度の比重0.7

程度という重さと、木工機械による加工が可能な加工性から、木材と類似用途に使用されており、屋外のデッキ、階段、ベンチ等に用いられている。観察に使用した X 線 CT 装置の観察視野領域の寸法的制限から、約 4cm×6cm の断面を有する角材形状の製品から長さ 4cm の試料を切り出し、観察試料とした。また、試料の圧縮に伴う内部変形等の観察・解析には、製品内部に大きな欠損（空隙）を有する場合を想定して、上記と同寸法の試料に貫通穴をあけたものについても観察試料とした。貫通穴は、試料の切断面から元の製品の長手方向、すなわち載荷方向と直交する方向に、切断面および側面からみて、厚み方向の中央部に直径 4mm の穴を 3 カ所あけた。観察試料の外観を図 1 に示す。

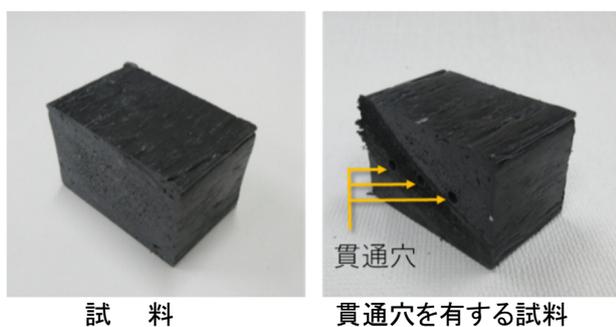


図 1 試料外観

## 2.2 観察・解析方法

### 2.2.1 試料の観察・解析

試料を X 線 CT 装置（島津製作所製 inspeXio SMX-225CT）で撮像し、解析ソフトウェア（VOLUME GRAPHICS 製 VGSTUDIO MAX ver.2.01）にて解析を行った。

撮像は X 線管電圧 130kV、管電流 40 $\mu$ A、画素サイズ 0.174mm/voxel で行った。観察・解析は、撮像した CT 画像から解析ソフトウェアにより、三次元外観画像、透過画像を作成するとともに、ソフトウェアの欠陥検出機能を用い、空隙個数の分布、空隙率の算出を行った。空隙個数の分布図、三次元画像については、空隙体積に応じた色分けを行った。また、三次元画像について試料内部の観察のため仮想断面切断画像を作成した。

### 2.2.2 試料の圧縮に伴う内部変形等の観察・解析

圧縮試験の試験途中で圧縮操作を停止し、試料を取り出し、X 線 CT 装置により観察を行った。観察条件等は 2.2.1 のとおり。載荷面は、元の角材の表面、6cm×4cm とした。試験・撮像操作は、予め設定したひずみまで試料に圧縮載荷した後、試料を試験装置から取り外し、X 線 CT 装置により撮像した後、再び、試験装置に取り付け、次の設定ひずみまで載荷、取り外し、撮像という操作を繰り返した。設定ひずみは 0.03、0.088、0.175、0.3、0.5 の 5 段階とし、小さな設定ひずみから順に試験操作を行った。圧縮速度は 1mm/分とした。一連の試験・撮像終了後、解析ソフトウェアにて解析を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 試料内部観察・解析

試料中の空隙個数の分布、空隙率を図 2 に示す。試料中の空隙は体積 5mm<sup>3</sup> 程度以下のものが大部分を占めた。試料の空隙率は 12.32% であった。

空隙を体積の大小により色分け、可視化した三次元画像を図 3 に示す。空隙は体積 0mm<sup>3</sup>～50mm<sup>3</sup> を青色～緑色～赤色に色分けした。試料表層部には空隙はほとんどみられないが、それ以外の部位では、図中、濃い青色の 5mm<sup>3</sup> 程度以下の空隙が広くほぼ一様に存在した。

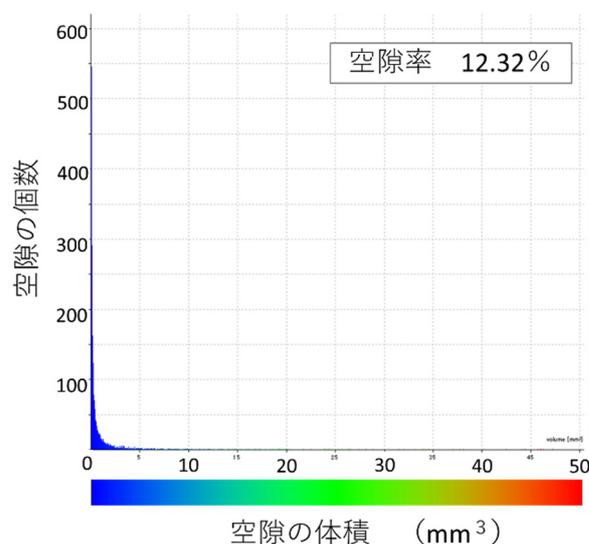


図 2 試料中の空隙個数分布

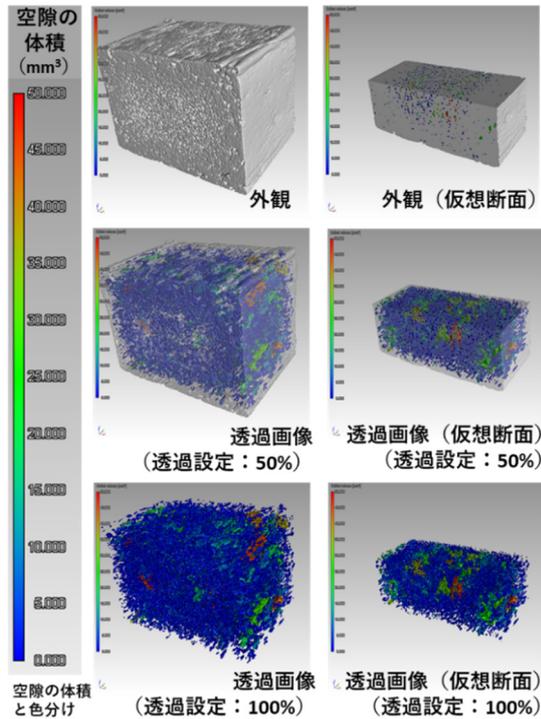


図3 空隙部を可視化した三次元画像

黄緑色の  $30\text{mm}^3$  程度の空隙、橙色の  $45\text{mm}^3$  程度の空隙は数カ所にみられ、それらは表層に近い部分に存在するものもあれば、断面中央に近い部分にみられるものもあった。

以上のように、試料内部の空隙形状と分布を非破壊かつ三次元的に X 線 CT 装置により観察、分析することができた。

### 3.2 試料の圧縮に伴う内部変形等の観察・解析

#### 3.2.1 試料の圧縮に伴う内部変形等の観察・解析

設定した圧縮ひずみにおける試料の三次元画像と応力-ひずみ曲線を図4に示す。空隙は3.1と同様に色分けした。応力-ひずみ曲線は観察試料と同形状の別試料の圧縮試験により得られたものを図中に示したものである。

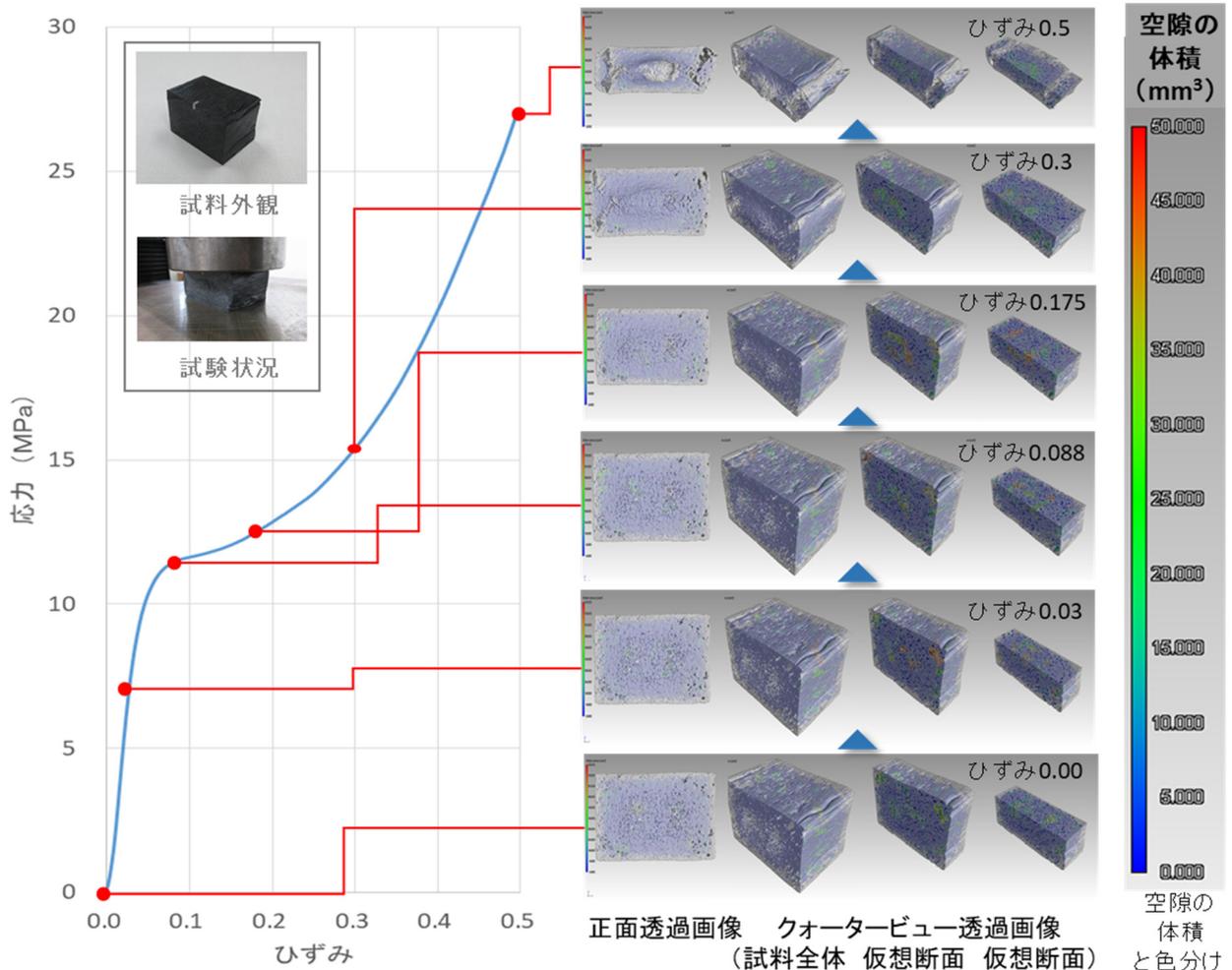


図4 試料の圧縮に伴う内部変形等

ひずみ 0.00 の圧縮開始からひずみ 0.5 の圧縮終了までの間、表層を除く試料内部全体を青色の体積  $5\text{mm}^3$  以下程度の空隙が占めた。圧縮開始時、ひずみ 0.00 では、表層を除く試料内部全体を青色の体積  $5\text{mm}^3$  以下程度の空隙が占める中、一部に黄緑色の体積  $25\text{mm}^3$  程度の空隙が存在している。圧縮開始後、ひずみ 0.03 では、試料の角部分の表層に近い箇所に黄橙色の体積  $40\text{mm}^3$  程度の空隙が生じた。その後、比例限度付近であるひずみ 0.088 では黄橙色の体積  $40\text{mm}^3$  程度の空隙は減少し、ひずみ 0.175 にかけて、再び増加するものの、それ以降、それらは次第に減少した。ひずみ 0.175 以降、試料内部の空隙の減少に伴い、試料正面の外側方向への隆起が生じ、遅れてひずみ 0.3 においては、正面からみて長方形の角部分から対角線方向に割れ破壊が発生した。

その後のひずみ 0.5 の試験終了時においては、上面の角部分からの割れ破壊と下面の割れ破壊は連続し、また、その破壊は試料長手方向にわたるものとなった。

以上のように、観察試料が载荷され、破壊に至るまでの試料内部の変形挙動を X 線 CT 装置により観察することができた。

### 3.2.2 貫通穴を有する試料の圧縮に伴う内部変形等の観察・解析

設定した圧縮ひずみにおける試料の三次元画像と応力-ひずみ曲線を図 5 に示す。空隙は 3.1 と同様に色分けした。応力-ひずみ曲線は観察試料と同形状の別試料の圧縮試験により得られたものを図中に示したものである。

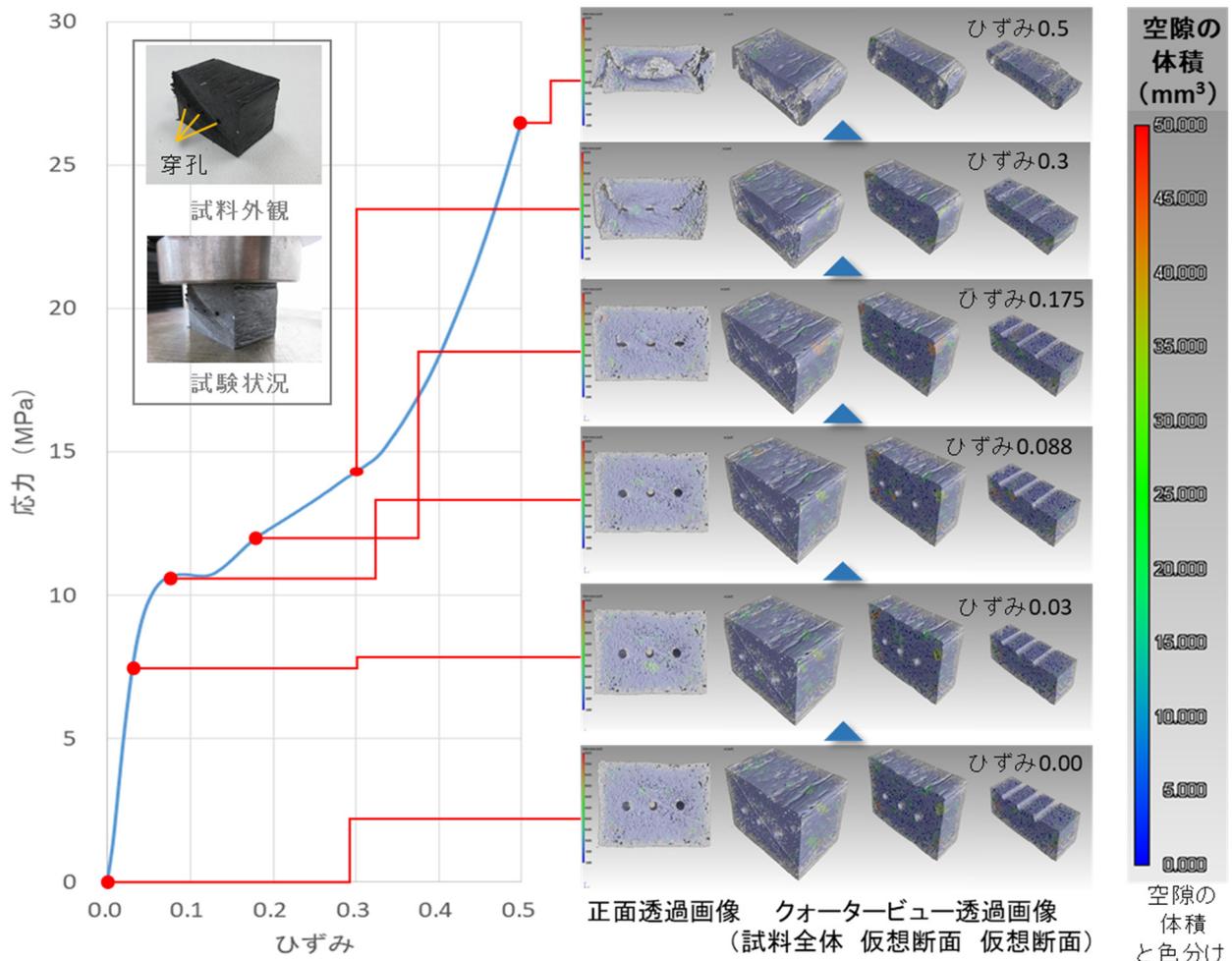


図 5 貫通穴を有する試料の圧縮に伴う内部変形等

ひずみ 0.00 の圧縮開始からひずみ 0.5 の圧縮終了までの間、表層を除く試料内部全体を青色の体積 5mm<sup>3</sup> 以下程度の空隙が占めた。試料にあけた貫通穴の形状も明瞭に確認することができた。貫通穴の形状は、ひずみ 0.00~0.088 では、ほとんど変形がみられないものの、ひずみ 0.175 から上下方向につぶれていく様子が確認できた。

圧縮の開始に伴い、試料内部全体に青色の体積 5mm<sup>3</sup> 以下程度の空隙が存在する中、一部に黄緑色の体積 25mm<sup>3</sup> 程度、黄橙色の体積 40mm<sup>3</sup> 程度の空隙が存在した。圧縮開始後、ひずみ 0.088 まで、黄橙色の体積 40mm<sup>3</sup> 程度の空隙部分が次第に増していった。ひずみ 0.175 では、ひずみ 0.088 にみられた黄緑色の部分が、黄橙色に変化しており、空隙が増している様子が確認できた。その部分は、その後ひずみ 0.3 では再び黄緑色となり、圧縮に伴い空隙が減少する様子がみられた。ひずみ 0.3 においては、試料正面からみて長方形の角部分から対角線方向に割れ破壊の開始がみられ、ひずみ 0.3 以降、角部分から発生した割れが貫通穴につながっていく様子を観察することができた。その後、ひずみ 0.5 の試験終了時において、角部分からの割れ破壊は上下の割れ破壊及び、貫通穴と連続したものとなり、その破壊は試料長手方向にわたるものとなった。

以上のように、内部に大きな欠損（空隙）を有する観察試料が載荷され、破壊に至るまでの試料内部の変形挙動を X 線 CT 装置により観察することができた。

#### 4. おわりに

観察試料としたプラスチックリサイクル建材について、X 線 CT 装置により試料内部の観察、解析が可能であることを確認した。また、試料に載荷され、破壊に至るまでの試料内部の変形挙動についても X 線 CT 装置により、観察することができた。

今後のプラスチックリサイクル建材の高機能化、他材料との複合化といった製品開発の進展において、X 線 CT 装置による非破壊かつ三次元的な観察、解

析手法が活用されていくことを期待する。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、観察試料の提供他においてご協力をいただきました有限会社山陰クリエートに感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 佐藤充男;精密工学会誌,精密工学会,Vol.82, p.529-532(2016).
- 2) 近藤圭秀;木材工業,日本木材加工技術協会,VOL.67,p.102-107(2012).
- 3) 野村昌樹,福田聡史,西沢美代子,中田由美子,真鍋薫平;あいち産業科学技術総合センター研究報告 2013,あいち産業科学技術総合センター, p.28-31(2013).
- 4) 安田征一,松下泰幸;木材工業,日本木材加工技術協会, VOL.58, p.252-257(2003).