

X線を用いた複合材－金属板界面の圧縮せん断挙動の可視化 X-ray observation of shear behavior between composite and metal plate

竿本 英貴^a, 後藤 良次^a, 杉浦 昇^a, 表 竜二^a, 田中 真人^a, 山口 聡^a
Hidetaka Saomoto^a, Yoshitsugu Goto^a, Noboru Sugiura^a, Ryuji Omote^a, Masato Tanaka^a,
Satoshi Yamaguchi^a

^a株式会社 豊田中央研究所
^aToyota Central R&D Labs.Inc.

複合材料と金属板の界面におけるせん断や摩擦は、クラッチやブレーキなどの自動車部品に応用されている。これらの部品には高摩擦係数・耐摩耗性能など、様々な要求が課されるが、界面での現象を観察することが困難であることから、界面上でせん断力や摩擦力がどのように発揮されるのかについては未解明な部分が多い。ここでは、高解像度 X 線 CT を利用し、直接材料界面の状態を可視化することを試みた。結果、垂直力を載荷した場合に界面近傍での接触状態が変化する現象や複合材内の各原料の配置状態が鮮明に可視化できた。

キーワード： X 線 CT, 複合材料, 界面

背景と研究目的：

自動車の構成部品であるクラッチやブレーキは常に摺動しており、過酷な摩擦条件（高温・高圧、ダスト）のもとで多岐にわたる要求性能を満たすためには複合材料の使用が必須条件となる。

摺動する複合材には①高摩擦係数、②耐摩耗、③耐高温、④長期耐久性など、様々な要求が課されるが、複合材の設計は経験的な要素が強く、複合材を構成している原料が上記要求項目に対してどのように寄与しているのかは十分に把握できていない。

近年、自動車の軽量化・環境対策という方針のもと、摺動する複合材に対して上記①、②に対する要求が特に高まっているが、複合材が摩擦力を発揮するメカニズムおよび摩耗粉の生成過程については未解明な部分が多い上、これまでに有用な観察方法が提案されていない。そこで SPring-8 の高解像度 X 線 CT[1]を用いて、複合材－金属板の界面を直接可視化することにより、複合材のせん断、摩擦現象を把握しようとするのが今回の目的である。

実験方法：

実験手順の概要を図 1 に示す。今回は小型の界面せん断試験機を製作し、SPring-8 の回転ステージ上に設置して実験を行った。実験手順は以下のとおりである。

(1) 複合材料を金属材料に一定荷重で垂直方向に押し付ける、(2) 金属材料に水平方向のせん断変位をマイクロオーダーに加え、界面にせん断力を付与する、(3) せん断変位を加えていき、所定の値となったとき、X 線 CT 撮影を行う。これらの作業途中では、押付力と金属板に作用するせん断力をロードセルにより測定している。界面に接触している複合材料の直径は 2mm（円形）であり、押付面圧は 3.5MPa とした。複合材料は、金属粒子、有機材料、無機材料など 10 種類程度の原料からなっており、X 線のエネルギーを 50keV と設定することで十分な画質の断層像が得られた。なお、得られる断層像の解像度は 1000×1000 ピクセル（2μm/ピクセル）である。また、複合材を押し付ける金属板には、アルミ板（円柱形、底面が直径 4mm の円、高さ 2mm）を用いた。

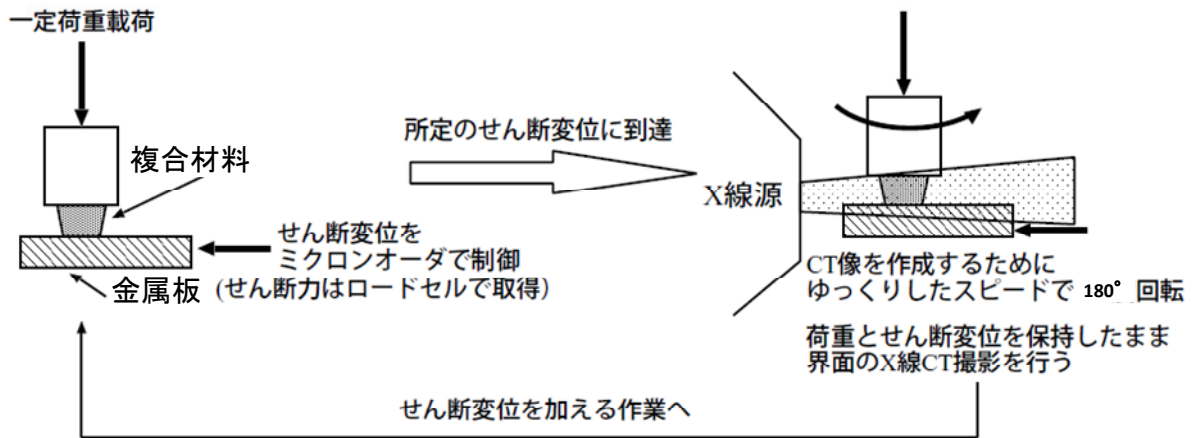


図 1. 実験手順の概要

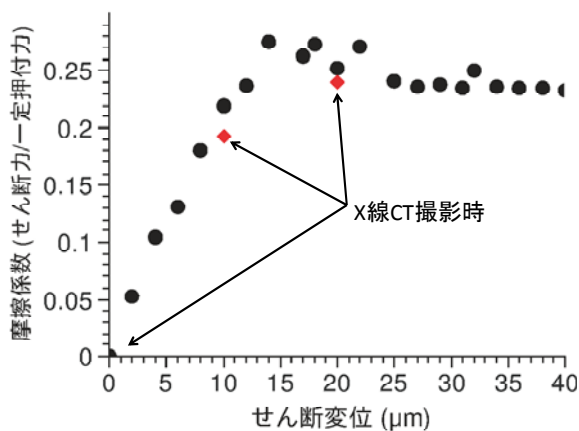


図 2. 荷重-変位曲線の例

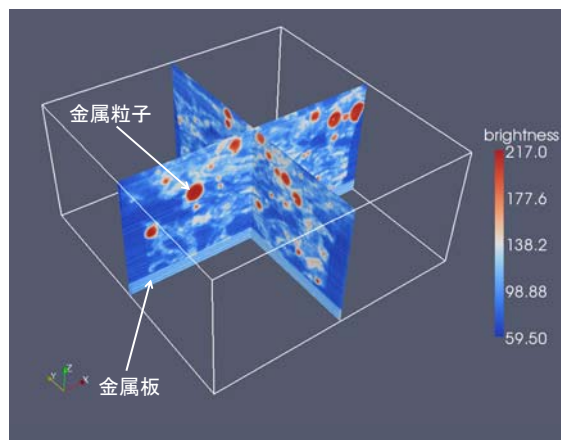


図 3. X線CT像を積層して再構成した3D像

結果および考察：

図 2 に、得られた荷重-変位曲線の一例を示す。横軸は金属材料に与えたせん断変位を、縦軸はせん断力を押付力で除した摩擦係数相当の量（以下摩擦係数と表記）をそれぞれ示している。せん断変位が $15\mu\text{m}$ 以下の領域では、せん断変位と摩擦係数には線形関係が認められ、界面中ですべりがほとんど発生していないものと考えられる。 $15\mu\text{m}$ の摩擦係数のピークを境に界面にはすべりが生じ、摩擦係数が増加しなくなる。ピーク後の摩擦係数は、わずかに低下していき、 $25\mu\text{m}$ 以降はほぼ一定の値（0.23）を示している。X線CTは、せん断変位が零の時に2回（無負荷時、押付力負荷時）、せん断変位が $10\mu\text{m}$ と $20\mu\text{m}$ の時に各1回撮影している。なお、1回のCT撮影に要する時間は、約30分である。CTを撮影している最中、材料が応力緩和を起こすことによりせん断荷重が少し低下するが、応力緩和に起因するCT像のぶれはほとんど確認できない。この理由は、無負荷時のCT像の画質と応力緩和が生じた場合のCT像の画質に大きな差がないことによる。

図 3 は、得られた断層像を積層することにより再構成した複合材および界面近傍の3次元構造である。輝度が高く球状になっている領域は金属粒子であると推察される。金属粒子の他、繊維系の原料と考えられる領域もCT像から確認することができた。このような3次元情報は、有限要素解析に代表されるCAE (Computer-Aided Engineering) 解析を実施するための、入力情報としても活用できる[2][3]。

図 4 は、せん断変位および押付力を载荷する前の界面近傍の断層像（図 4 (a)）と垂直力のみを载荷した時点での界面近傍の断層像（図 4 (b)）、および両者の輝度差分布（図 4 (c)）を並べたものである。図 4 (c) 中で、輝度差が大きく出ている領域が垂直力を载荷することにより金属板に接触した領域であると考えられる。以上のように複合材内の原料の配置状態のみならず、界

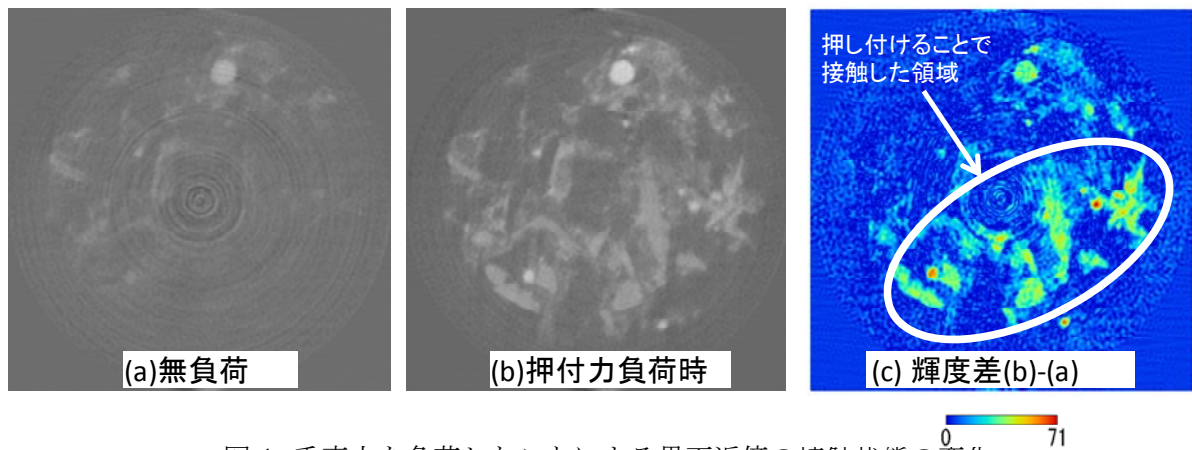


図 4. 垂直力を負荷したことによる界面近傍の接触状態の変化

面近傍での接触状態の変化も X 線 CT を通じて可視化することができた。なお、せん断時の界面状態は現在解析中である。

今後の課題：

今回の実験では、せん断変位の付与方法がリニアゲージを見ながらスライドさせるという方法であったため、摩擦現象という観点からは加えた変位量が十分ではない可能性がある。今後は試験片を回転させるなどの方法により十分な変位量を与えられるような改良が必要と考える。

参考文献：

- [1] 上杉健太郎, 竹内晃久, 鈴木芳生：放射光 X 線 CT の基本, 非破壊検査 検査と材料評価, Vol.58, No.10, pp.420-425, 2009.
- [2] Hollister,S.J., Kikuchi, N.: Homogenization theory and digital imaging: A basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue, Biotechnol.and Bioeng., Vol.43, Issue.7, pp.586-596,1994.
- [3] Matsushima, T., Saomoto, H., Uesugi, K., Tsuchiyama, A. and Nakano, T.: Detection of 3-D irregular grain shape of Toyoura sand at SPring-8, X-ray CT for Geomaterials: Proc. International workshop on X-ray CT for geomaterials, Balkema, pp.121-126,2004.