



材料強度試験への計測サービス適用

Sakurai Kaori

櫻井 香織^{*1}

Tanakamaru Tempei

田中丸 天兵^{*2}

当社では材料強度試験に対し、保有の計測技術を適用することで独自の付加価値を高めたソリューションを提供することを目指している。本稿では製品（実機）試験へ DIC と AE を適用した事例を紹介する。DIC では繰り返し荷重試験と組み合わせ、ひずみ分布可視化により損傷位置を推定した。破壊に至らないような低荷重下でも、応力集中箇所を把握し、複雑な構造物の損傷位置を推定できる可能性を示した。AE 計測では試験体に圧縮荷重を繰り返し付与しながら、初期損傷と損傷位置を標定した。AE 計測結果は X 線 CT 観察で評価した。AE 計測により初期損傷と損傷位置標定が可能であることを確認した。

キーワード： 材料強度試験、機械試験、繰り返し荷重試験、疲労試験、製品試験、実機試験、デジタル画像相関法（DIC）、アコースティック・エミッション（AE）、X 線 CT 検査

1. はじめに

当社では規格に準拠した試験以外にも製品（実機）形状での材料強度試験を実施している。また、保有する他の技術と連携をとることで、材料強度試験と併せたさまざまな計測サービスを提供することも可能である。計測サービスを材料強度試験に適用することは、JIS などの規格で定められている試験で得られる機械的性質に加え、損傷の箇所や要因、さらにその要因推定を行うための情報を取得することも可能である。それらの情報は製品（実機）形状での材料強度試験において特に有用と考えられる。そのため、規格で定められていない製品（実機）形状での材料強度試験に対し、当社保有の計測サービスを適用することで付加価値を高めたサービスを提供しており、またそのソリューション提供の拡大を目指している。

本稿では規格で定められていない製品（実機）形状での材料強度試験に対し、デジタル画像相関法（Digital Image Correlation、以下、DIC）やアコースティック・エミッション（以下、AE）計測、および X 線 CT を適用した試験事例を紹介する。

2. 試験体

2.1 対象物

対象物は、実機の例として曲面形状、複雑形状である以下の 2 つを選定した。

- (1) タマゴ
- (2) 骨（シカの大腿骨）

タマゴは形状データを取得して試験体を作製し、骨は実物を試験に供した。

*1：計測事業部 化学・材料部 材料グループ

*2：計測事業部 化学・材料部 材料グループ 主査

2.2 試験体作製

工業用非接触 3D スキャナである ATOS を用いてタマゴの形状データを取得し、3D プリンターで ABS 樹脂製の試験体を作製した。作製した試験体を図 1 に示す。

3. 繰り返し荷重試験への DIC の適用

3.1 試験概要

繰り返し荷重試験中の試験体を DIC で計測した。DIC は、試験体表面に斑点模様（スペックルパターン）を塗布し、そのパターンをカメラで撮影して変位やひずみを計測する手法である⁽¹⁾⁽²⁾。貼り付けた箇所のひずみを計測するひずみゲージに対し、DIC は試験体のひずみ分布を広範囲で可視化できることが特徴である。一方で、計測結果は画像データの品質に影響を受けるため、例えば曲率が大きなものなどのピントが合いにくい試験体では計測が困難となる。そこで本試験では、

曲率の大きなタマゴに対し、DIC を用いたひずみ分布の可視化可否について検討した。

3.2 試験条件

以下の条件で繰り返し荷重試験を実施した。図 2 に試験状況を示す。

- (1) 試験体 : ABS 製タマゴ
- (2) 試験機 : 島津製作所製 油圧サーボ式 疲労試験機 $\pm 5\text{kN}$
- (3) 試験温度: 室温
- (4) 試験速度: 0.4Hz
- (5) 荷重条件: 同じ試験体に対し事前に静的荷重を付与して破壊荷重を確認した。破壊荷重をもとに荷重ステップを決定し、それぞれ 20 回繰り返ししながら荷重を上げた。ステップを表 1 に示す。
- (6) 試験停止: 試験体に損傷が発生するまで (試験機変位による確認)
- (7) DIC 計測機器 : Correlated Solutions VIC-3D ver.9



図 1 試験体写真一覧 (対象物、3D データ、試験体)

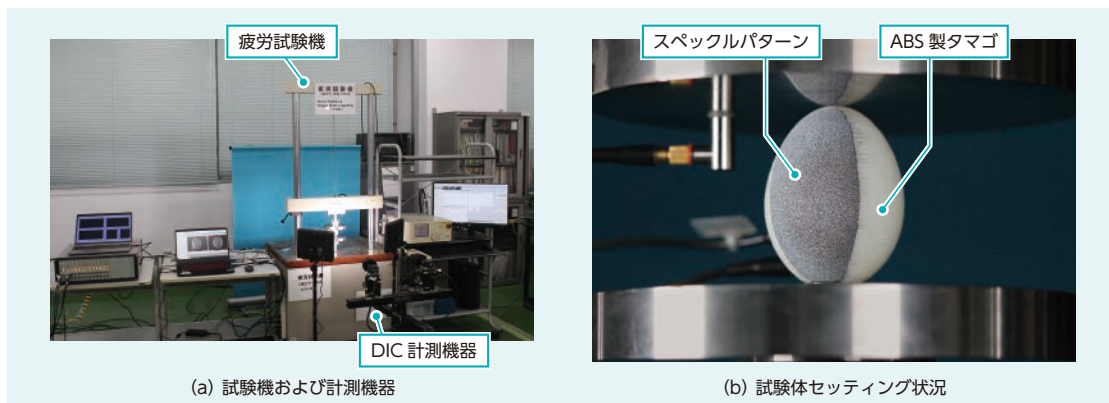


図 2 試験状況

3.3 結果

図3に、繰り返し荷重試験で得られた荷重 - 変位グラフを示す。試験体は 1.4kN 負荷時のサイクル 128 回で座屈し破壊した。DIC の計測で得られた、0.2kN 負荷時の水平方向ひずみ分布コンター図を図4に、鉛直方向ひずみ分布コンター図を図5に示す。タマゴに圧縮荷重が付与され、水平方向には引張ひずみ、鉛直方向には圧縮ひずみが発生している。計測が困難と考えられる大きな曲率をもつタマゴのような試験体でも問題なくひずみ分布を得られることが確認できた。また、試

験初期である 10 回の時点で図中の黄色丸で示したタマゴ上部に大きなひずみが発生していることも確認した。さらには、繰り返し荷重負荷によりいずれのサイクルでもタマゴの同じ位置に高いひずみが発生していることも確認した。したがって、本タマゴ試験体の応力集中部はタマゴ上部の高ひずみ発生位置であると考えられる。図6に試験後の試験体写真を示す。タマゴの上部で座屈による損傷が発生していることが確認でき、ひずみ分布コンター図で観察された高ひずみ値の発生位置と実際の損傷位置はよく一致していた。

表 1 荷重条件

圧縮荷重 [kN]								繰り返し数 [回]
step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8	
0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	各 20

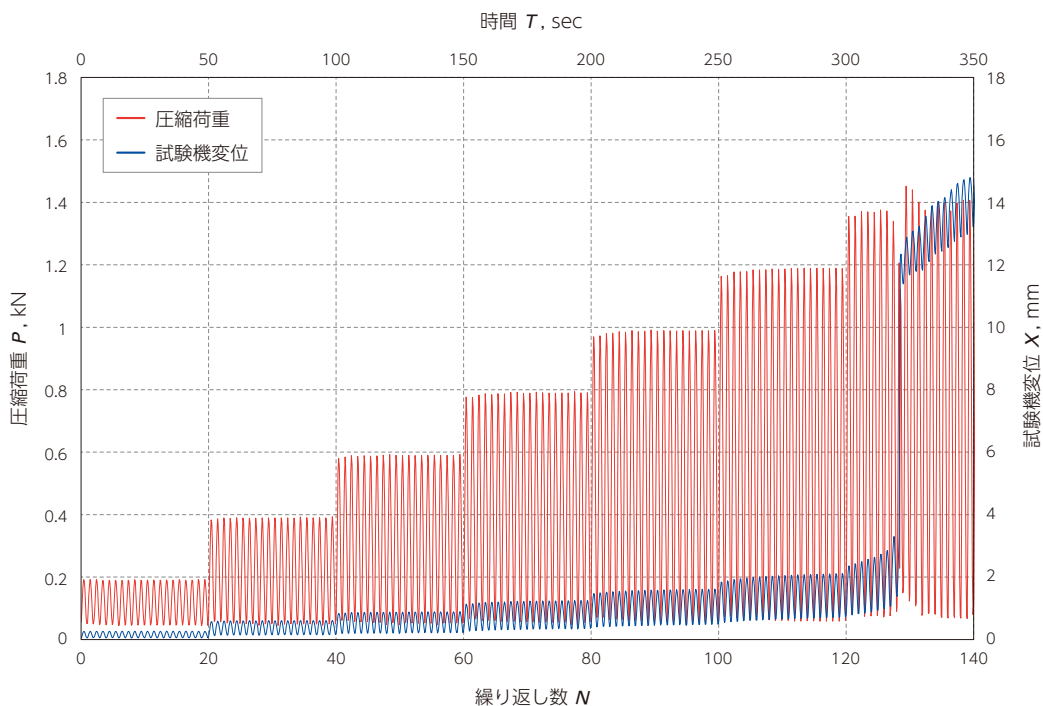


図 3 荷重 - 試験機変位グラフ

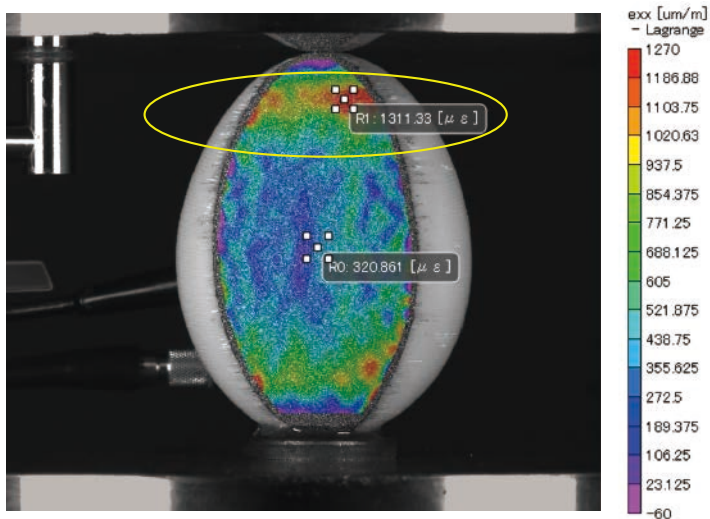


図 4 DIC 計測結果、水平方向ひずみ分布コンター図、0.2kN 負荷時

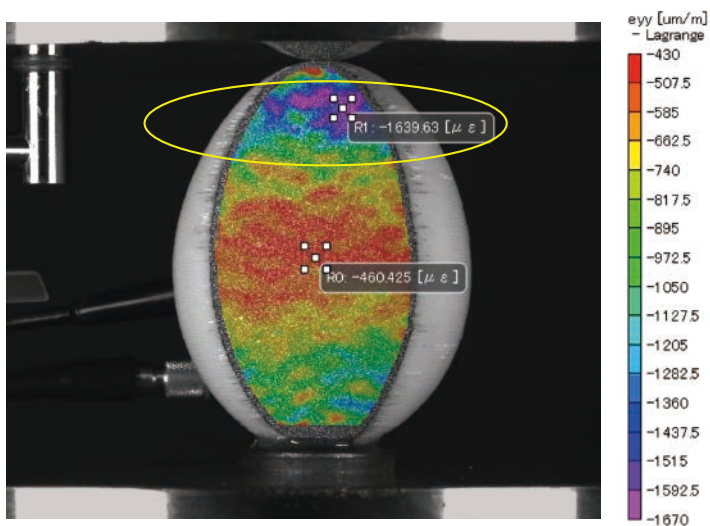


図 5 DIC 計測結果、鉛直方向ひずみ分布コンター図、0.2kN 負荷時



図 6 試験後の試験体

4. 繰り返し荷重試験への AE 計測、および X 線 CT の適用

4.1 試験概要

図 7 に示す骨の実物試験体を用いて、試験体に圧縮荷重を繰り返し付与しながら、AE 計測により骨の初期損傷と損傷位置標定を試みた。材料に荷重を与えると、ひずみエネルギーが蓄積される。蓄積されたエネルギーが破壊によって開放される過程で、その一部が超音波領域の弾性波として放出される。その弾性波を AE 波という。⁽³⁾ AE 波を計測することにより、目視では確認できないような初期の損傷発生や損傷位置の標定が可能である。今回は試験前後で試験体に X 線 CT を適用し、損傷状態と損傷位置も確認した。

図 8 に示すシカの骨格図より試験体の部位を同定し、実際に力が負荷されると考えられる角度で荷重を負荷した。

4.2 試験条件

以下の条件で繰り返し荷重試験を実施した。図 9 に試験体セッティング状況を示す。試験体の骨幹部へ 4 点の AE センサを等間隔に取り付けた。

- (1) 試験体 : 骨 (シカの大腿骨)
- (2) 試験機 : 島津製作所製疲労試験機
± 100kN
- (3) 試験制御 : 荷重制御 -sin 波
スタート時 最小圧縮荷重 0.1kN、
最大圧縮荷重 1.0kN
最大圧縮荷重が 1.0kN に到達後、
徐々に最大圧縮荷重を増加させた。
- (4) 試験速度 : 0.4Hz
- (5) 停止条件 : AE が計測されたら停止する
- (6) 試験体取付け角度 : 約 30 度
- (7) AE 計測機器
 - ①装置 : AMSY-6 MB19 (Vallen Systeme 製)
 - ②センサ : AE144A センサ (富士セラミックス製)
 - ③プリアンプ : AEP5 (ゲイン 34dB) (Vallen Systeme 製)
 - ④ソフトウェア : Visual AE バージョン 2022.0809.3 (Vallen Systeme 製)
- (8) X 線 CT 撮影条件
 - ①撮影装置 : マイクロフォーカス X 線 CT 東芝 IT コントロールシステム製 TXScanner-32300FD
 - ②ソフトウェア : VG studio max 2021.1



図 7 骨の試験体

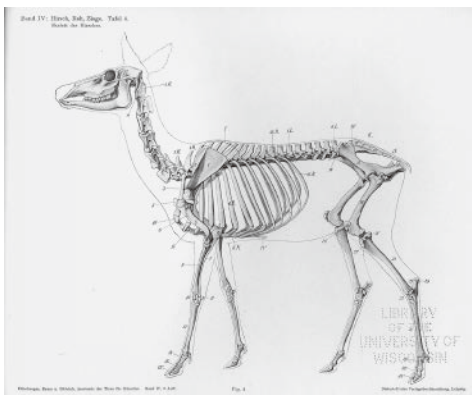


図 8 シカの骨格図 (4)

← 図中右後肢大腿骨

4.3 結果

図 10 に荷重 - 試験機変位 - サイクル数グラフを示す。圧縮荷重約 1kN の荷重振幅が安定した後に試験体に損傷を発生させるため徐々に圧縮荷重を増加させた。1.2kN 載荷中に AE を観測したため、試験を停止した。

図 11 に AE 計測による損傷位置標定結果を示す。横軸は位置座標、縦軸は位置座標に標定され

た AE の回数、線の色は AE 信号の強度（桃 > 青 > 黄）である。また、横軸の 1～4 の数字はセンサのチャンネル位置を示している。CH.1-CH.2 の範囲で AE が多く計測され、特に CH.1 付近は 40dB 以上（桃色）の AE の発生数が多かった。これより損傷位置は試験体の下部に取り付けたセンサ CH.1-CH.2 間と標定された。

試験前後の試験体を X 線 CT で撮影した結果を

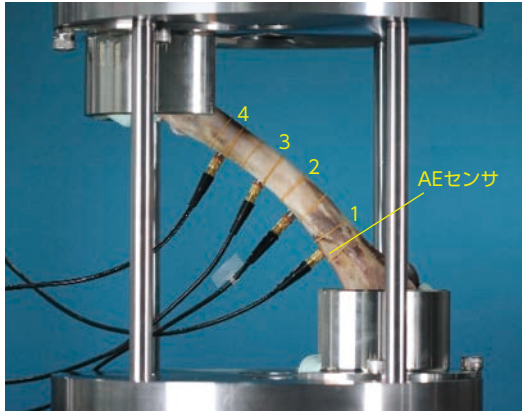


図 9 試験体セッティング状況

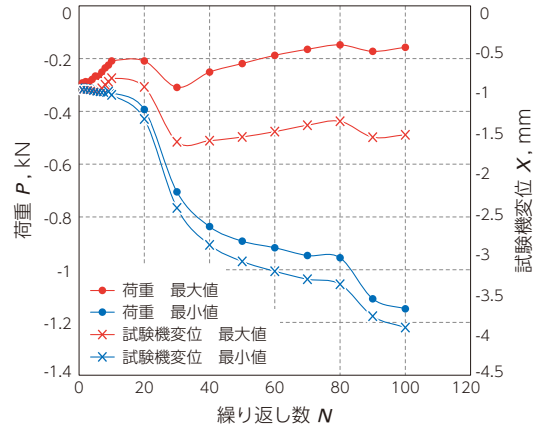


図 10 荷重 - 試験機変位グラフ

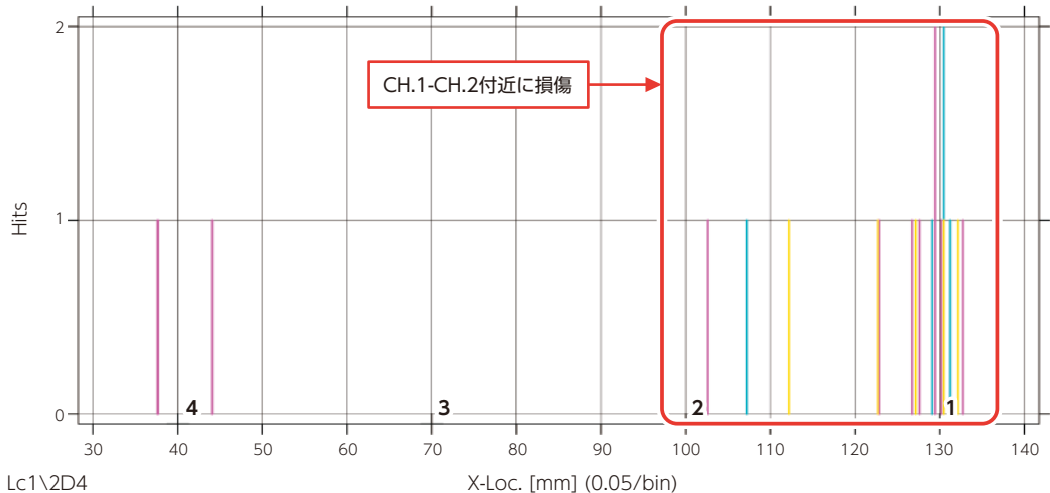


図 11 AE 計測による損傷位置標定結果

骨の圧縮試験における AE 位置評定結果。センサ間隔は 30mm。表中の 1～4 の数字はセンサのチャンネル番号と対応している。信号強度でプロットの色をわけている。

図 12 ~ 15 に示す。AE センサ CH.1 部の試験前の X 線像を図 12 に、試験後の X 線像を図 13 に示す。試験前後の X、Z 方向の断面図の比較により、黄色丸で示す内部組織（画像中のグレーに映っている部分）が損傷していることがわか

る。図 14 に、AE センサ CH.2 部の試験前の X 線像を、図 15 に試験後の X 線像を示す。X、Y 方向の断面図より、黄色丸で示す内部組織に試験前には見られなかった亀裂が存在していることが確認され、40dB 以上の AE で標定された位置と、X



図 12 試験前の X 線 CT X 線像 AE センサ CH.1 部

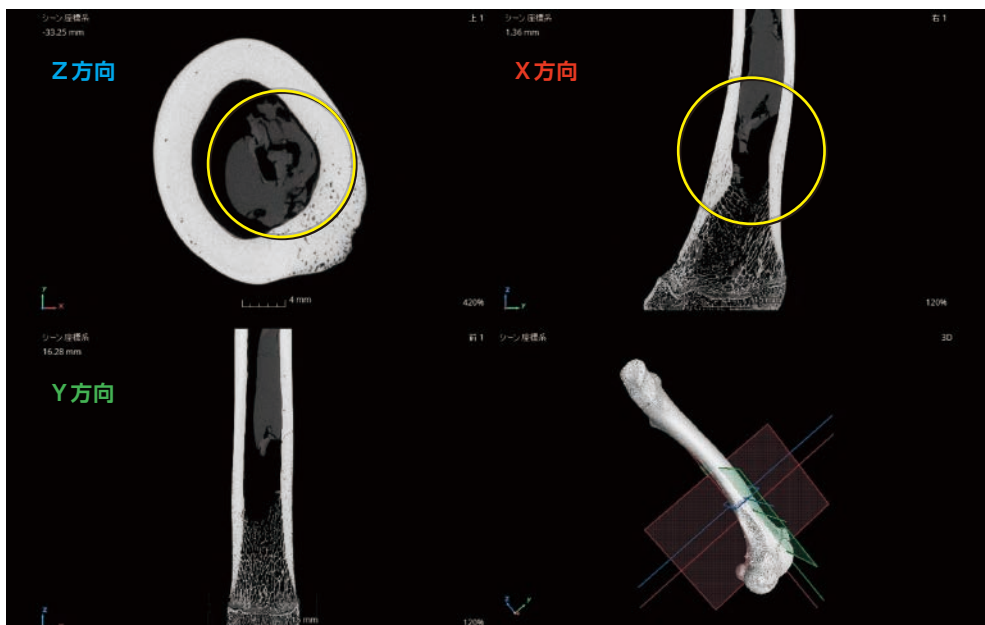


図 13 試験後の X 線 CT X 線像 AE センサ CH.1 部

線 CT で観察した損傷部の位置が一致していることが確認された。

以上より AE 計測により試験中に発生した初期損傷の発生タイミングと損傷位置を同定することができた。なお、今回とらえた初期損傷は骨髄等

の内部組織の損傷であった。この試験・計測手法で骨の表面を構成する硬質部の初期損傷を捉えることを目的とする場合は、事前に予備試験片等で発生する AE の違いを調査しておく必要があると考える。

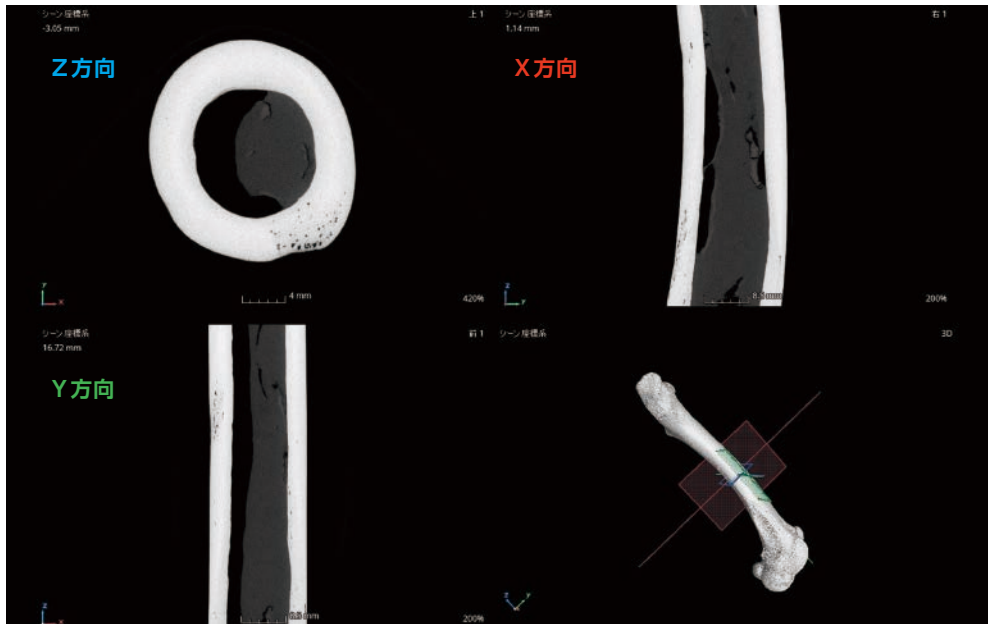


図 14 試験前の X 線 CT X 線像 AE センサ CH.2 部

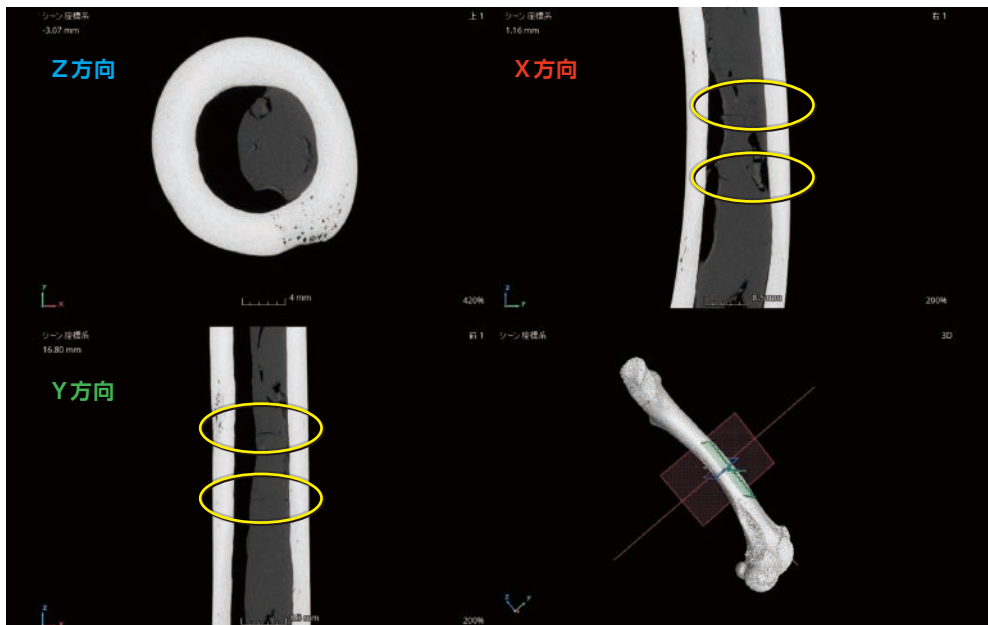


図 15 試験後の X 線 CT X 線像 AE センサ CH.2 部

5. まとめ

製品（実機）試験への計測サービス適用事例として、DIC を用いたひずみ分布可視化による損傷位置推定事例と、AE 計測による初期損傷および損傷位置標定の事例を紹介した。

(1) 繰り返し荷重試験および DIC

本試験では、DIC での計測が困難とされる曲率の大きなタマゴを試験体として DIC を適用し、ひずみ分布の計測が可能であることを確認した。

試験体に圧縮荷重を負荷すると、大きなひずみが発生する箇所が存在することを確認した。また、負荷荷重を増加させていくと、その高ひずみ発生部で試験体が座屈し、損傷位置は DIC で計測された高ひずみ発生部と一致した。

破壊（座屈）に至らないような低荷重を負荷し DIC で計測することで、複雑な構造物でもあらかじめ応力集中箇所を特定することが可能となり、損傷発生を予防することや損傷が発生した場合でも構造上の問題か素材そのものの問題かを切り分けることができる可能性を示した。

(2) 繰り返し荷重試験、AE 計測、および X 線 CT 観察

骨の実物試験体を用いて繰り返し荷重試験を実施した。試験体に圧縮荷重を繰り返し付与しながら、AE 計測により骨部の初期損傷と損傷位置標定を試み、標定結果を X 線 CT 観察により確認した。その結果、AE 計測で標定した損傷位置と X 線 CT 観察で確認した損傷位置は一致した。

複数の要素を含む試験体（今回では骨髄等の内部組織と骨の表面を構成する硬質部）において、目的の要素の損傷をとらえるためには、事前に発生する AE の違いを調査しておく必要がある。

本稿で紹介した試験はそれぞれ単独での計測適用例を紹介したが、今回紹介した技術以外にも計測サービスを保有しており、複数の計測を組み合わせることも可能である。当社の保有技術を用いてさまざまな試験に対応していく。

謝辞

JAPAN TESTING LABORATORIES 株式会社
試験体の X 線 CT 撮影を実施いただいた。

参考文献

- (1) 李志遠、王慶華、有川秀一、米山聡：
面内変位分布計測におけるデジタル画像相関法とサンプリングモアレ法の比較研究、実験力学、Vol.15、No.4、2015、pp.303-308
- (2) 朝倉悠太、及川秀行：
デジタル画像相関法を用いたひずみ分布計測、IIC REVIEW、No.64、2020/10、pp.46-51
- (3) 一般社団法人日本非破壊検査協会：
アコースティック・エミッション試験 I、2006、pp.5-6、
- (4) UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, LIBRARIES SEARCH：
<https://search.library.wisc.edu/digital/A2A25MVEJZQXR8T>



計測事業部 化学・材料部
材料グループ
櫻井 香織

TEL 045-791-3516
FAX 045-791-3542



計測事業部 化学・材料部
材料グループ 主査
田中丸 天兵

TEL 045-791-3516
FAX 045-791-3542