



ハイスピードカメラを用いた 画像解析事例の紹介

Asakura Yuta

朝倉 悠太^{*1}

当社では、2024年度にハイスピードカメラを導入し、ハイスピードカメラで撮影した画像を画像解析することにより、速度や加速度の算出、および、ひずみ分布の算出が可能となった。本稿では、ハイスピードカメラを用いた速度、加速度の算出、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）材の引張試験による破壊時の撮影、およびCFRPの引張試験時のひずみ分布計測に関する事例について紹介する。

キーワード： ハイスピードカメラ、画像解析、デジタル画像相関法（DIC）

1. はじめに

近年、画像解析技術の進歩に伴い、撮影された画像データや動画データを画像解析することにより、加速度や振動数、ひずみ、流速など多くの物理量を加速度センサやひずみゲージをはじめとする接触式のセンサを使用しなくても計測可能になっている。また、接触式のセンサは1つのセンサで1つの物理量のみでの計測に限られるのに対し、画像解析では撮影した画像から複数の物理量を算出することができる。画像解析の中でも特に、ハイスピードカメラを用いた計測技術は急速に発展しており、流体の流れ場の可視化⁽¹⁾や燃焼⁽²⁾、溶接⁽³⁾、材料試験⁽⁴⁾など多くの分野に適用が進んでいる。

当社では、2024年度にハイスピードカメラを導入し、撮影した画像を用いて、加速度などの計測に適用を進めてきた。本稿では、ハイスピードカメラを用いた試験体の落下による衝撃加速度の

算出、および、複合材の破壊挙動と表面のひずみ分布計測の2種類の計測事例について紹介する。

2. 導入したハイスピードカメラ仕様

図1に当社で導入したフォトロン社製のハイスピードカメラ（FASTCAM Nova S6）を示す。本ハイスピードカメラは、画素数1024×1024 pixel、内部メモリ64GB、フルフレームの最高撮影速度は6,400fpsであり、画素数を128×16pixelにすることにより800,000fpsの撮影速度で撮影が可能な性能を有したものである。また、当社では、フリッカ現象が発生しない大型の光源として、図2に示すアイテックシステム社製の光源（LFSR4FW）を2台所有しており、撮影速度の条件によるものの、1mを超える画角においても十分な光量で撮影をすることが可能である。

*1：計測事業部 計測技術部 試験・解析グループ 一般計量士、環境計量士（騒音・振動関係）



図1 導入したハイスピードカメラ



図2 ハイスピードカメラ用光源

3. 衝撃加速度の算出

一般的に物体の加速度を計測する場合には、圧電型やひずみゲージ式などの加速度センサが用いられる。しかしながら、複数個所の加速度を計測したい場合には、計測点数分の加速度センサを設置する必要がある。また、電源などに起因するノイズの影響も考慮しなければならない。一方、ハイスピードカメラでは、**図3**に示すようなターゲットシールを計測対象に貼り付けることで、カメラがターゲットを視認できる範囲内で撮影した全フレームにおけるターゲット位置を画像解析から追跡し、速度や加速度を算出することが可能である。本章では、試験体が落下して床面に衝突した際の落下速度および衝撃加速度を計測した事例を紹介する。

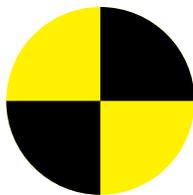


図3 ターゲットシール

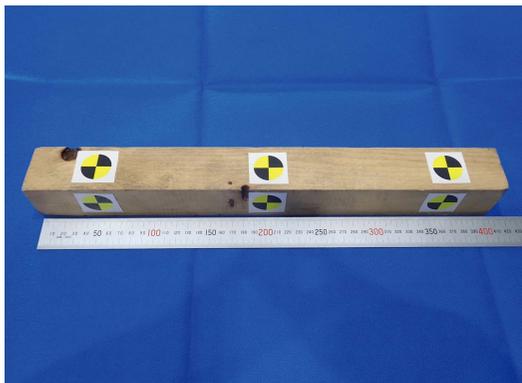


図4 落下衝撃試験用試験体



図5 落下衝撃試験状況

試験体は、43×43×400mmの木材とし、直径25mmのターゲットシールを全周に約150mm間隔で貼り付けたものとした。ターゲットシールを貼り付けた試験体写真を**図4**に示す。落下試験では、試験体の長手方向が落下方向となるようにし、約5.2mの高さから自由落下させた。ハイスピードカメラでの撮影は、画角を1,953×1,953mm（分解能：1.9068mm/pixel）、サンプリングレートを1,000fps、シャッタ速度を1/4,000sec、録画時間を2.0secとした。画像解析は、Image Systems社の動画解析ソフトTEMA CLASSICを使用し、試験体が撮影画角に入ってから、ターゲットシールが視認可能であった0.5sec間について実施した。**図5**に落下衝撃試験状況を示す。

落下体挙動のハイスピードカメラ画像を**表1**に示す。本解析では、ターゲットシールが視認できた

表 1 落下衝撃試験時のハイスピードカメラ画像

時刻	t=0.000sec	t=0.140sec	t=0.176sec
撮影画像			
時刻	t=0.212sec	t=0.277sec	t=0.343sec
撮影画像			

時刻を 0.000sec とした。本画像から、試験体は 0.212sec で床面に接触した後、上方に跳ね返ったことがわかる。図 6 から図 8 にそれぞれ落下衝撃における速度、加速度、および、床面高さをゼロとしたときの鉛直方向変位の時刻歴変化のグラフを示す。いずれのグラフも縦軸の正方向が鉛直上向き方向である。これらの図に示した通り、試験体が自由落下している間は速度がほぼ線形的に増加し、加速度は重力加速度の影響によりマイナス側の値となった。また、変位は自由落下中の落下速度の増加により曲線的な変化を示した。その後、試験体が床面に衝突して速度がプラス方向に急激に増加した後、重力加速度の影響により、自由落下時とほぼ同じ傾きで減速した。加速度は、床面に衝突した際の衝撃加速度として、1,324m/s² が計測された。

解析で得られた自由落下時における床面衝突前の最大速度は 9.88m/s であり、自由落下時に

おける落下直前の速度の理論値は、 $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 5.2} \approx 10.10\text{m/s}$ であることから、本試験において計測された速度の相対誤差は約 2.1% であった。衝撃加速度の理論値は、落下直前の速度を衝撃時間で除したもので表されるが、衝撃時間を理論的に推定することは難しい。本試験において、最大速度が計測された時間から試験体が地面衝突して速度がほぼゼロになるまでの時間 Δt は 0.009sec であった。この時間 Δt を衝撃時間と仮定とした場合、理論衝撃加速度は $a = \sqrt{2gh} / \Delta t = \sqrt{2 \times 9.8 \times 5.2} / 0.009 = 1,122\text{m/s}^2$ であり、衝撃加速度の計測値は約 18% の相対誤差が発生した。原因として、本試験で実施したサンプリングレートが 1,000fps であり、正確な衝撃時間が算出できていないと考えられる。サンプリングレートを 2,000fps 以上して撮影することで、衝撃時間や衝撃加速度の算出精度が向上するものと考えられる。

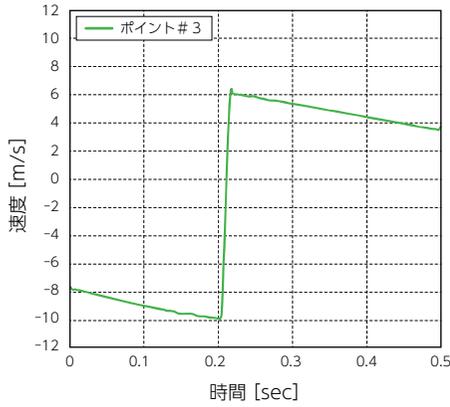


図6 落下衝撃における速度の時刻歴変化

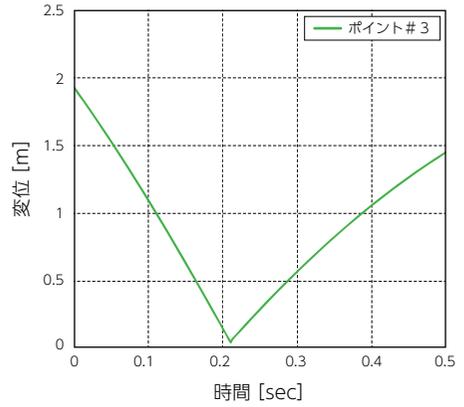


図8 落下衝撃における鉛直方向（Y方向）変位の時刻歴変化

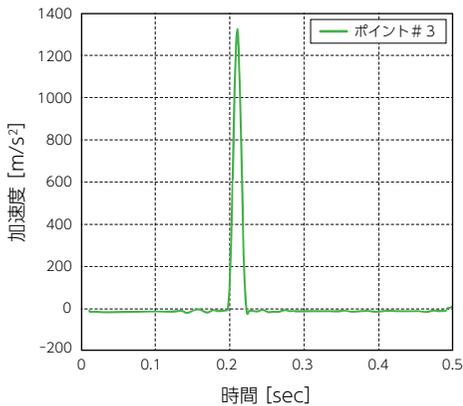


図7 落下衝撃における加速度の時刻歴変化

4. CFRP材の引張試験

CFRPなどの複合材の強度は、その形状や繊維の配向方向の影響を受けるため、それらの影響を正しく評価する必要がある。複合材を対象とした

引張試験におけるひずみ計測では、複合材用のひずみゲージを接着しても、ひずみゲージ接着位置でマイクロクラックなどが発生した場合、ひずみゲージが断線する可能性があるとともに、破壊起点を事前に予測してひずみゲージを接着することも難しいため、破壊直前のひずみを計測することは難しい。また、複合材の破壊現象は非常に高速であることから、一般的なカメラでは破壊時の挙動を撮影することができない。そこで、デジタル画像相関法（Digital Image Correlation, 以下DIC法と記載）をハイスピードカメラに適用することにより、高速で破壊するCFRPの破壊挙動の可視化、および、ひずみ分布の計測が可能を検討した。

DIC法とは、**図9**に示すように試験体表面に白と黒から構成されるランダム模様（スペckルパターン）を塗装し、スペckルパターンをカメラで

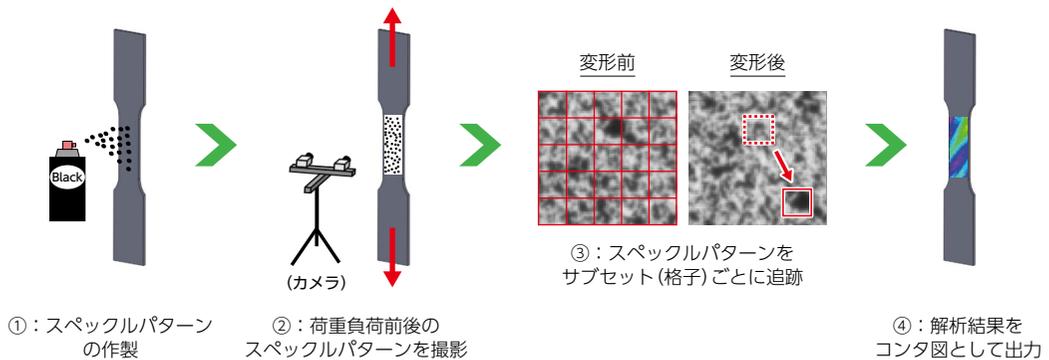


図9 DIC法の計測概略図

撮影することで、荷重負荷に伴う試験体の変形前後のスペックルパターンの相関から変位分布やひずみ分布を画像解析により計測する手法である⁽⁵⁾。

本章では、DIC法を用いて、短冊型のCFRP試験体を対象として引張試験を実施し、一般的なDIC用のカメラで撮影し解析したものと、ハイスピードカメラで撮影し解析したものとひずみの比較結果、および、50,000fpsで撮影した際の破壊挙動を撮影した事例を紹介する。

試験体は長さ250mm、幅25mm、厚さ3mmの短冊形のものを使用して、疲労試験機にて引張試験を実施した。試験体には東レ社製のP3252S-20のプリプレグを使用し、CFRPの繊維方向は45deg方向に一樣な $[45^\circ]_{16ply}$ 、および、0,45,90,135degで積層された疑似等方材 $([0,45,90,135^\circ]_{2s})$ の2種類とした。CFRPの両端にはGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製のタブ(長さ50mm)を接着した。スペックル

パターンの塗装は、GFRPタブを除く試験体全体の長さ150mm、幅25mmの範囲に施工した。疲労試験機による引張試験状況を図10に示す。引張試験は室温環境かつ変位制御とし、試験条件は、表2に示す通りとした。試験No.1とNo.2ではDIC用カメラとハイスピードカメラとのひずみ分布の比較を実施し、試験No.3では50,000fpsの高速撮影した場合のCFRPの破壊挙動を確認した。ハイスピードカメラは撮影時間が内部メモリ容量に依存することから、カメラの違いによる比較試験では、DICカメラとハイスピードカメラで試験機速度を変更した。各カメラで撮影した画像は、Correlated Solutions社のVIC-2Dを用いて表2に示すサブセットサイズにて解析を実施し、荷重軸方向(鉛直方向eyy)のひずみ分布を算出した。

はじめに、試験No.1とNo.2におけるカメラの違いによる比較結果について記載する。DIC



図10 ハイスピードカメラを用いた引張試験状況

表2 引張試験条件

試験No.	使用機材	試験体	試験機速度	画素(鉛直)	画素(水平)	画角(鉛直)	画角(水平)	分解能	撮影速度	シャッター速度	サブセットサイズ
			[mm/min]	[pixel]	[pixel]	[mm]	[mm]	[mm/pixel]	[fps]	[sec]	[pixel]
1	DIC用カメラ	$[45^\circ]_{16ply}$	1	2,048	2,448	154.8	185.1	0.0756	10	1/40	21
2	ハイスピードカメラ	$[45^\circ]_{16ply}$	60	1,024	512	158.6	79.3	0.1549	10,000	1/16,000	15
3	ハイスピードカメラ	$[0,45,90,135^\circ]_{2s}$	2	384	256	122.7	81.8	0.3196	50,000	1/100,000	15

カメラおよびハイスピードカメラで撮影した破壊直前の荷重軸方向のひずみ分布を図 11 に示す。ここで、各カメラのひずみ分布は DIC カメラで応力 58MPa 時、ハイスピードカメラで応力 69MPa 時の結果である。ひずみ分布から DIC カメラ、ハイスピードカメラともにほぼ同じひずみ分布が得られた。DIC カメラおよびハイスピードカメラの応力ひずみ線図の比較結果を図 12 に示す。ここで、荷重軸方向のひずみは解析範囲全体の平均ひずみとした。この図に示した通り、ハイスピードカメラの方が DIC カメラと比較して 1,000 倍の撮影速度であるため、より破断直前の

高い応力時のひずみまで計測ができていたことがわかる。また、40MPa 以下の応力では、DIC カメラとハイスピードカメラの結果がほぼ一致していることから、撮影時の画素数や試験機速度の違いはあるものの、ほぼ同様の精度で計測できているものと考えられる。

次に、試験 No.3 における結果について記載する。CFRP 疑似等方材を用いた高速撮影時の CFRP 破壊前後の撮影画像を表 3 に示す。この図では、破壊直前の画像を時刻 0.00000sec として記載した。破壊が下部のチャック付近から発生し、上部のチャックに向かって亀裂が進展する様子を

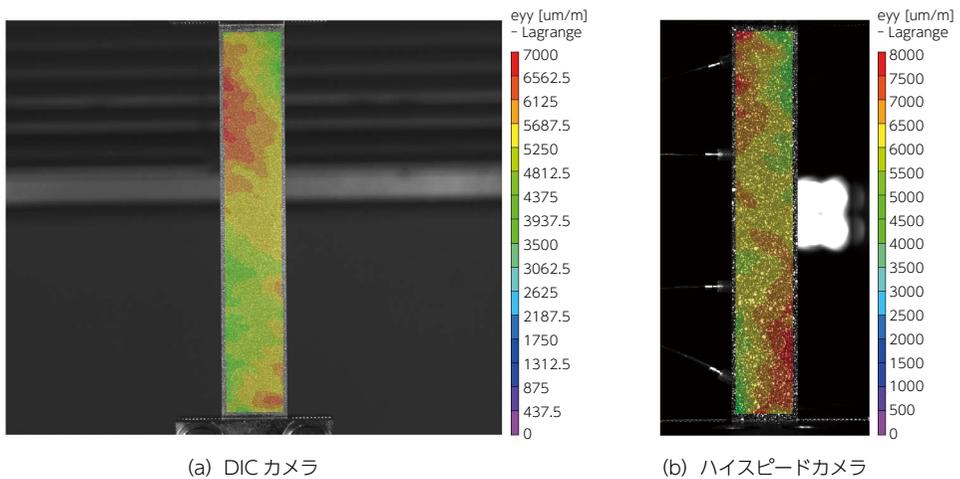


図 11 荷重軸方向ひずみ分布比較結果

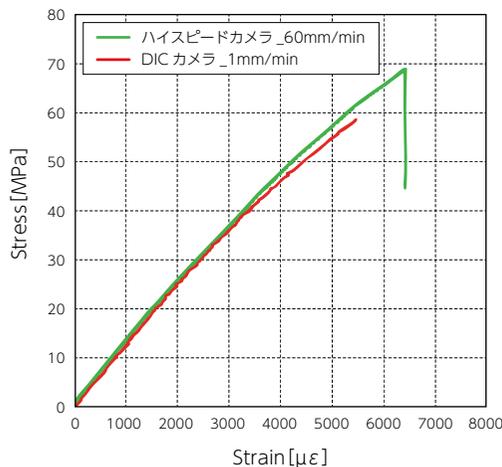


図 12 応力 - ひずみ線図 比較結果

表 3 CFRP 破壊時の高速撮影結果

時刻	破壊直前		破壊後				
	0.00000sec	0.00002sec	0.00004sec	0.00006sec	0.00008sec	0.00014sec	0.00044sec
画像							

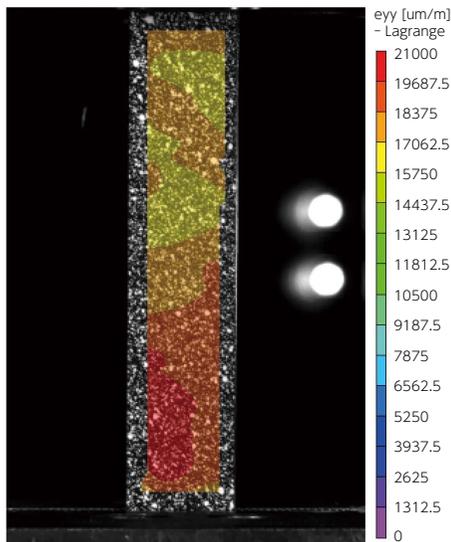


図 13 高速撮影時の CFRP 破壊直前のひずみ分布

確認できた。図 13 に破壊直前の荷重軸方向のひずみ分布を示す。この図に示した通り、破壊が開始される位置でひずみが局所的に高くなっていることがわかる。表 2 の試験条件に示している通り、50,000fps の撮影速度で撮影する場合、画素数を 384 × 256pixel まで解像度を低下させる必要があったことから、ひずみ分布の空間解像度は低いものの、破壊位置と局所的な高ひずみ位置は一致した。このことから、ひずみ分布の空間解像度が低下する課題はあるが、高速撮影でも定性的なひずみは取得可能であると考えられる。

5. まとめ

本稿では、ハイスピードカメラを用いた衝撃加速度計測、デジタル画像相関法を用いたひずみ

分布計測について紹介した。最近のハイスピードカメラは、画素数やセンサ感度が大きく向上していることから、画像解析に使用しても十分に適用可能となっている。今後は従来の接触式のセンサから画像解析技術にシフトしていくことが予想されていることから、ハイスピードカメラだけでなく、画像解析技術を用いたより多くの技術の検討を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 大倉康裕、樋口和哉、浦田泰弘、染矢聡、店橋護：高速 PIV によるエンジン燃焼室内の乱流計測、日本機械学会論文集 (B 編)、Vol.79、No.806、2013、pp.319-332
- (2) 岩田和也、松山新吾、小島淳、布目佳央、川島秀人、丹野英幸、水書稔治：JAXA における回転デトネーションロケットエンジンの基礎的波面現象の解明および性能実証への取り組み、日本燃焼学会誌、Vol.62、No.200、2020、pp.16-24
- (3) 坂口俊介：ハイスピードカメラを使用した溶接現象の可視化・解析、溶接学会誌、Vol.87、No.4、2018、pp.39-42
- (4) 平野義鎮、草野英昭、青木雄一郎：異なるひずみ速度における CFRP 引張破壊の高速度撮影および DIC 解析による評価、日本複合材料学会誌、Vol.40、No.4、2014、pp.21-27
- (5) 朝倉悠太：デジタル画像相関法 (DIC) を用いたひずみ分布計測事例の紹介、IIC REVIEW、No.72、2024/10、pp.11-17



計測事業部 計測技術部
試験・解析グループ
一般計量士、環境計量士
(騒音・振動関係)

朝倉 悠太

TEL 045-759-2085