

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：82108  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23656093  
 研究課題名（和文）超高速変形時の微小ひずみ計測を可能とする CCD モアレ法の開発  
 研究課題名（英文）Development of CCD Moiré method to measure high speed deformation

**研究代表者**  
 岸本 哲 (KISHIMOTO SATOSHI)  
 独立行政法人物質・材料研究機構・ハイブリッド材料ユニット・主席研究員  
 研究者番号：10354169

研究成果の概要（和文）：高速撮影が可能な CCD カメラ等のデジタルカメラを用いて、高速変形を計測可能とする高速モアレ法を開発した。従来のモアレ法は、2つの（変形する試料上に作るモデル格子と基準となるマスター格子）を重ね合わせることで生じる濃淡の縞（モアレ縞）より変形量を求める手法である。このマスター格子をデジタルカメラの撮像素子の配列に変えることにより、計測に必要な画素数を極端に減らして、より高速での変形を計測できるようにした。

研究成果の概要（英文）：A new moiré method using high speed digital camera has been developed. A digital high-speed camera with a solid state image sensor readout unit was used to observe the moiré fringes of the specimen during an impact test. The very fine metallic mesh was used for the model grid and the pixel array of the solid state image sensor readout unit was used for the master grid. Comparing to the other high-speed moiré method using a master grid, it is possible that a number of pixels for a moiré image can be decrease and the interval of each image shorten.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：材料設計・プロセス・物性・評価・CCD モアレ法・高速変形

#### 1. 研究開始当初の背景

従来、高速で変形する物体に生じる変形を観察・計測するためには高速度カメラを用いて物体を撮影し、物体自体の変形や物体の数カ所から数十箇所を設置したマーカーの位置の動きより変形量を求めていた。またランダムなパターンを表面に作製しておき、やはり高速度カメラを用いて画像を撮影して、画像パターンの動きより変形量を求めていた。しかしながら、物体自体に生成する変形、特に「ひずみ」や「すべり」を視覚的に観察することはできなかった。またこれらの画像の撮影には、膨大なメモリーを有する高価な超

高速度カメラを必要とした。

研究代表者は光学的モアレ法のマスターグリッドの代わりに電子顕微鏡の走査線の平行線を用いる「電子線モアレ法」や走査型レーザー顕微鏡のレーザー照射を用いる「走査レーザーモアレ法」を開発した。これらの開発を進めるなかで、マスターグリッドを CCD カメラのセルにピクセルに置き換えてもモアレ縞が観察できることを明らかにし、これを高速度で撮影できる CCD カメラに応用すれば、数万分の1秒～数十万分1秒の間での材料の変形（特に材料中に生ずるひずみ、グリッドの回転、グリッドのずれ）を観察す

ることが可能ではないかという発想に至り本研究を開始した。

## 2. 研究の目的

高速で変形する物体に生じる変形を計測観察するため、高速変形時にモアレ縞を観察できる高速CCDモアレ法を開発する。従来の2つのグリッド（モデルグリッド：変形するグリッド、マスターグリッド：基準となり変形はしないグリッド）を重ね合わせる光学的モアレ法の場合、モアレ縞を観察するためには高解像度のデジタルカメラを必要としたが、このマスターグリッドをCCDカメラのピクセルに置き換えることにより、ピクセルの大きさがモデルグリッドと同程度でよい場合、ピクセルの数を大幅に減少させることができるため高速での撮影が可能となり、1万分の1秒以下の時間での材料の変形（特に材料中に生ずるひずみ等）の観察・計測が可能とする。

## 3. 研究の方法

### ①モデルグリッドの作製

試料上観察面に目的に応じたモデルグリッドを作製する。数ナノメートルから数十ミクロン間隔のモデルグリッドは、電子線リソグラフィあるいはナノインプリントを用いる。数ミクロンから数百ミクロンのモデルグリッド作製は金属の試料にはフォトリソグラフィやフェムト秒レーザー描画装置を用いて作製する。電子線リソグラフィやフェムト秒レーザーを用いたグリッド作製法はすでに確立している。また、ポーラス材料やプラスチック材料などリソグラフィおよびフォトリソグラフィを用いることのできない場合はナノインプリントおよびグリッドシートを貼り付ける手法を用いる。

### ②高速CCDモアレ法の開発

モデルグリッドを明暗の違いとして観察できるように照明等を調整する。CCDカメラのピクセルの大きさがモデルグリッドの大きさとほぼ同じになるようにCCDカメラの倍率を調整し、CCDモアレ縞を観察する。撮影したCCDカメラの個々のピクセルにおいてモデルグリッドの明の部分が最も大きいピクセルを最も明るい部分とし、最も暗い部分を最も暗い部分として、その中間の部分はグレー領域としてモアレ縞を形成させる。さらに画像処理によりそのモアレ縞の中心を得るようにする。

### ③衝撃変形測定

シリンダーの内部を重錘が落下する落錘型の衝撃変形測定装置を用い、試料の変形の様子を高速CCDカメラで撮影し、CCDモアレ縞を観察する。シリンダーの長さを調節して重錘の速度を、重錘の質量を変化させて衝撃エネルギーを調節して、試料に重錘が

衝突したときの試料や重錘のひずみや変形をCCDモアレ法で観察し、ひずみを解析する。さらにこの時、試料底部の荷重の経時変化を測定し、荷重の伝播とひずみ速度との関係を比較する。

### ④変形量の計測

モアレ法を用いたひずみおよびすべり量測定法は、マスターグリッドの間隔を  $a$  モアレ縞の間隔を  $d$  とするとひずみ  $\epsilon$  は幾何学的な解析により  $\epsilon = a / (d - a)$  で求まる。またモデルグリッドにずれが生じた場合は観察されるモアレ縞はより大きなずれが生じる。このグリッドはモアレ縞のずれを  $\Delta d$  とするとグリッドのずれ  $\Delta$  は同様に幾何学的な解析により  $a (\Delta d / d)$  で表わされる。

### ⑤二軸方向の高速変形量の計測

直交グリッドを用いると、CCDカメラのピクセルはX、Y方向に配列されているので二軸方向のモアレ縞を同時に観察することができる。X、Y方向のひずみはそれぞれ  $\epsilon_x, \epsilon_y = a / (d_x, d_y - a)$  で求まる。ここで  $d_x, d_y$  はX方向、Y方向のモアレ縞の間隔である。またモデルグリッドにずれが生じた場合は上記④と同様に  $(\Delta d_x, \Delta d_y / d_x, d_y)$  で表わされる。この二軸方向のひずみの時間的変化を計測し、変形過程の解明に資する。

## 4. 研究成果

### ①モデルグリッドの作製

電子線リソグラフィやナノインプリントを用いて、試料上に数百ナノメートルから数ミクロン間隔のモデルグリッドを作製した。また、金属細線や樹脂細線を用いて作製した網を試料に貼り付けることによりモデルグリッドを作製した。このモデルグリッドを図1および図2のモデルグリッドとして示す。

### ②CMOS高速度カメラを用いたモアレ縞観察の原理

課題名ではCCDモアレ法と称したが、現在高速度カメラはCCD撮像素子を用いたデジタルカメラよりも、CMOS撮像素子を用いたデジタルカメラの方が高速で撮影できるので、CMOS撮像素子を有する高速度デジタルカメラを用いた。

図1にCMOS高速度カメラを用いたモアレ縞観察の原理を示す。モアレ法は何学的な2つのパターン（変形するモデル格子と基準となるマスター格子）を重ね合わせることにより生じる濃淡の縞（モアレ縞）より変形量を求める方法である。

本手法ではモデル格子として試料に微細な格子を描き、あるいはグリッドを貼り付け図1(a)、CMOS撮像素子を有する高速度カメラのCMOS撮像素子をマスター格子として用いる。図1(b)CMOS撮像素子に

取り込まれる画像の濃淡によりモアレ縞を生じさせ、図1(c)この縞の間隔よりひずみ分布を計測する手法である。

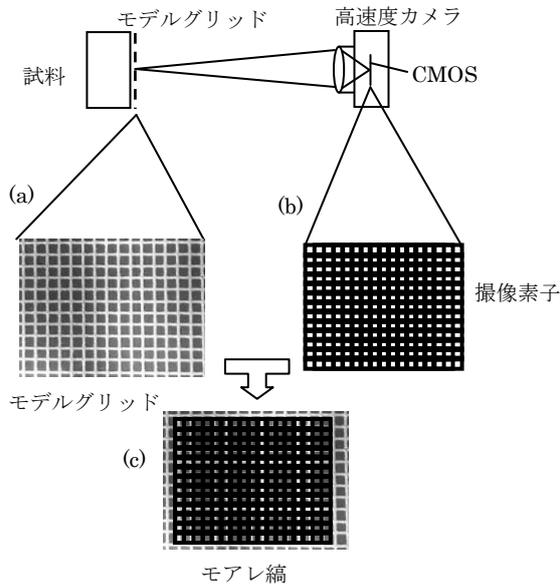


図1 高速度カメラによるモアレ縞発生原理

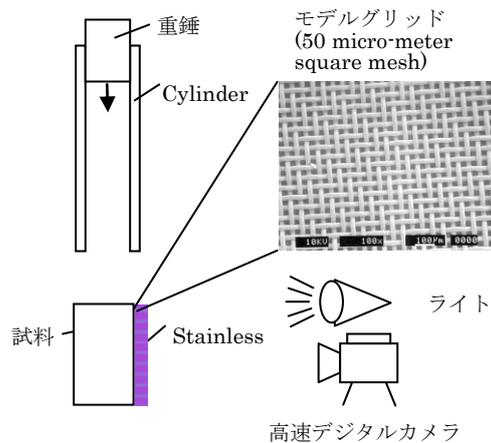


図2 落錘試験

### ③ 衝撃変形測定

落錘試験により試料に衝撃的な高速変形を生じさせた。図2に高速変形させるための落錘試験の模式図を示す。落下させる重錘は100gの円柱形のステンレス棒を用いた。重錘は透明なプラスチック製のシリンダーをガイドにして試験片まで落下する。重錘が試料に衝突し、試料表面に作製してあるグリッド(50 $\mu$ m 間隔)の変形する様子を高速度カメラ(Nobby Tech. Ltd. Phantom V9.1)を用いて撮影した。試料と高速度カメラの位置を適切に調節すると図3(a)に示すようなモアレ縞がえられる。

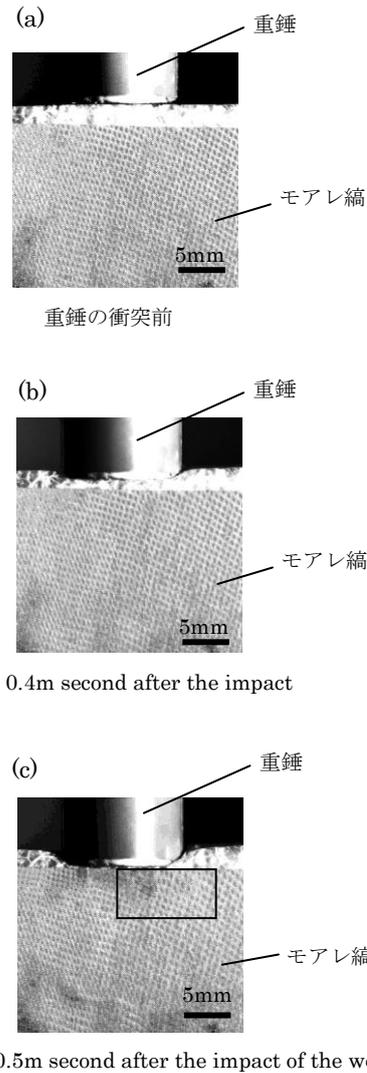


図3 高速モアレ縞；(a) 衝突直前 (b)；0.4ミリ秒後および(c)；0.5ミリ秒後

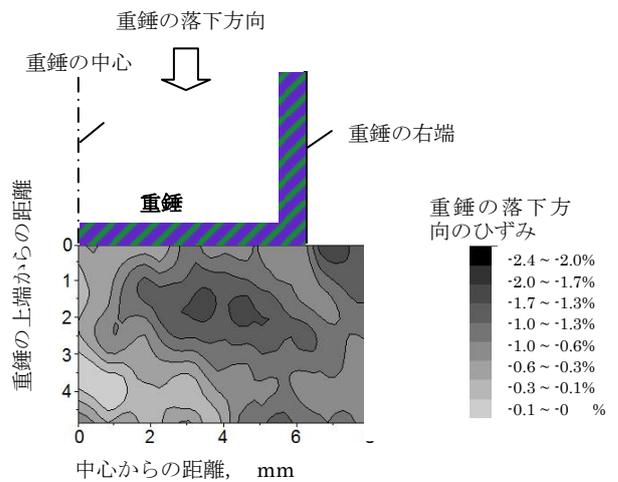


図4 図3の四角形内のひずみ分布

図3 (a), (b)および(c)に落錘試験により観察した高速モアレ縞を示す。図3 (a)は試料に重錘が衝突した瞬間、図3 (b)は試料に重錘が衝突してから0.4ミリ秒後の図3 (c)は0.5ミリ秒後の高速モアレ縞の写真である。重錘がグリッドに到達するまでに0.5ミリ秒を要しており、図3 (b)と図3 (c)とのモアレ縞の違いは衝突後0.4~0.5ミリ秒の0.1ミリ秒間の変化を示している。0.1ミリ秒間の変化であってもモアレ縞を鮮明に観察することができる。

#### ④高速変形量の計測

観察されたモアレ縞より高速変形中に生じるひずみを計測した。図4は図3 (b)と図3 (c)はモアレ縞の間隔の違いから図3 (c)におけるひずみを計測したものである。それぞれのモアレ縞よりグリッドと撮像素子の間隔の比(疑似的なひずみ)を求め、それぞれの差より3. 研究の方法の④および⑤の式を用いてひずみを求めたものである。図4の左端が重錘の中心で右側6mmの付近が重錘の右側端にあたる。高速変形は全体的に圧縮ひずみが生じているが、重錘直下、右側より2~4mmよりの部分に大きな圧縮ひずみが生じている部分が観察できる。

次の0.1m秒後の写真ではモデルグリッドも変形速度が大きく、シャッター速度が長かったため、ぶれによりモアレ縞を観察することができなかった。シャッター速度を上げるためには照明の光量を上げる必要があり、光量の高い光源とシャッター速度の高速化が今後の課題となる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1) 岸本哲、清水透、内藤公喜、香川豊、Mechanical Properties of Stainless Steel Cellular materials with Polyurethane、JOURNAL OF SOLID MECHANICS AND MATERIALS ENGINEERING、査読有、Vol.5、No.12、pp. 882-890、2011,12,28、DOI : 10.1299/jmmp.5.882

[学会発表] (計4件)

- ① 岸本哲、Dynamic Deformation Observation and Measurement of Porous Metal by Moiré Method、ISEM - ACEM - SEM - 7th ISEM、2012/11/08 - 2012/11/11、The Grand Hotel, Taipei, Taiwan、
- ② 岸本哲、Deformation of Cell Wall of metallic Cellular materials With Polymer during Compressive Test、The 3rd Asian Symposium on Materials and Processing、2012/08/30 - 2012/08/31、インド工科大学マドラス校、チェンナイ市、インド、
- ③ 岸本哲、CMOS 高速度カメラを用いたモアレ法による高速変形中に生じるひずみ計測 / CMOS 高速度カメラを用いたモアレ法による高速変形中に生じるひずみ計測、第61期学術講演会 / 日本材料学会、2012/05/25 - 2012/05/27、岡山大学、岡山市、
- ④ 岸本哲、Measurement of strain distribution of smart materials by electron Moiré method、SPIE Smart Structures / NDE 2012、2012/03/11 - 2012/03/15、Town & Country Resort, San Diego, California, 米国、

[その他]

ホームページ等

[http://samurai.nims.go.jp/pdf/KISHIMOTO\\_Satoshi-j.pdf](http://samurai.nims.go.jp/pdf/KISHIMOTO_Satoshi-j.pdf)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岸本 哲 (KISHIMOTO SATOSHI)  
独立行政法人物質・材料研究機構・ハイブリッド材料ユニット・主席研究員  
研究者番号 : 1 0 3 5 4 1 6 9

(2) 研究分担者      なし

(3) 研究連携者      なし