

高層ビルの強風時における振動計測への サンプリングモアレカメラの適用

中嶋 友朗* 仙波 悠生* 藤垣 元治*

Application of Sampling Moire Camera to Measurement of Vibration Caused by Strong Wind for High-Rise Building

Tomoaki NAKAJIMA*, Yusei SEMBA* and Motoharu FUJIGAKI*

(Received February 2, 2018)

Sampling moire camera was developed to measure the displacement of infrastructures effectively in real-time. An algorithm of a sampling moire method to analyze two-dimensional phase is embedded into the sampling moire camera. The sampling moire method is used for measuring the displacement of infrastructures. The sampling moire camera can measure and output displacement distributions for two directions in real-time from a two-dimensional grid image affixed on the ceiling of a building. In this paper, the sampling moire camera was applied to measure vibration of the building while rocking by a strong wind.

Key Words : Sampling Moire Method, Sampling Moire Camera, Building, Strong Wind, Measurement of Vibration

1. 緒言

近年、橋梁などのインフラ構造物の老朽化が進行しており、社会問題となっている^[1]。これに伴い、倒壊・崩落の危険性を考慮して、倒壊・崩落の前兆現象を事前に検査する技術の開発が必要視されている。

倒壊・崩落の可能性や修復の必要性を考察するには、定期的に大型構造物の変位を測定する必要がある^[2]。変位の測定方法として、一般的にひずみゲージ法、レーザー変位計、ワイヤー式変位計などのセンサが用いられている。これらのセンサを用いた計測手法では設置が困難な場合が多く、計測位置のみの情報しか得ることができなかった。そのため、より設置が容易で効率的な計測手法が求められている。そのための手法として、光学的手法を用いる技術の

開発が進められている^[3]。

本研究では、構造物の変位を非接触にて計測する方法として、サンプリングモアレ法^{[4]-[6]}を提案している。この手法は、格子画像に対してサンプリング処理を行うことで位相シフトされたモアレ画像を生成し、そこから位相分布を解析する空間的編解析法^{[7],[8]}を2次元に拡張したものである。

サンプリングモアレ法は、遠隔から大型構造物の変位を精度よく計測できる手法である。その測定方法は、まず格子の描かれているパターンを計測対象に貼り、対象の変位前後をカメラで撮影する。その画像をサンプリングし、モアレ干渉縞を得ることで、位相シフト法が適用でき、モアレパターンの位相分布を求めることができる。得られた位相の変化から対象物の変位を精度よく測定することができるものである。さらに研究室では、このサンプリングモアレ法のアルゴリズムをハードウェア化して、カメラ内部に組み込むことで、リアルタイムに変位分布を計測して出力できるサンプリングモアレカメラを開発した^{[9],[10]}。

*大学院工学研究科知能システム工学専攻

*Human and Artificial Intelligent Systems Course,
Graduate School of Engineering

サンプリングモアレ法の特徴のひとつとして、1フレームの撮影画像から2方向の位相分布を求めることができる点がある。橋梁の場合は、変位の鉛直方向成分を計測することが一般的である。そのため、橋梁の支点近くか遠方に、ほぼ水平に近い向きにカメラを設置して、鉛直方向の変位や、2成分を用いたわみ角を計測することに適用されている^{[6],[9]}。

一方で、高層ビルや風力発電用タワー、鉄塔など、縦型の大型構造物やインフラ構造物は、構造的に、地面に対して水平方向に揺れることが多い。そのため、カメラを鉛直上向きに設置して、計測対象の頂上付近を撮影することで水平2方向成分を計測することができる。本研究では、サンプリングモアレ法のこの特徴を利用して、水平2方向変位計測を建物の変位計測に適用する。計測実験に、サンプリングモアレカメラを用いることで、高速に時系列の変位計測を行い、振動解析にも適用できることを示す。

2. 原理

2.1 サンプリングモアレ法

サンプリングモアレ法とは、1枚の格子パターンから位相分布を算出する空間的縞解析法を用いて2次元格子の位相解析を行う手法である。図1(a)のような格子模様をカメラで撮影すると、図1(b)に示すように白と黒以外に灰色のデータも存在する。この状態ではモアレ縞を観察することはできない。そこで等間隔に N 画素ごと起点を変えながらサンプリング(間引き処理)を行う。図1(a)は $N=4$ pixelとした時の様子である。間引き処理を行うと、 $N=4$ pixelでは、図1(c)のように4画素おきにデータを持った4つの画像を得ることができる。これはそれぞれ左から1番目、2番目、3番目、4番目の画素から4画素ごとに間引いている。このように1画素ずつサンプリング点を変えることは、位相で考えると $\pi/2$ ずつシフトさせた状態になるので、位相シフト法に相当する。

しかしこのままでは間の3画素にデータがないので、データがない画素に各サンプリング点の輝度値のデータを補間する。すると図1(d)のような4枚のモアレ画像ができる。

位相シフトされたモアレ縞は近似的に余弦波の輝度分布をもっているとみなすと、 n 回位相シフトさせた時、次式で表される。

$$I_n(x, y) = I_a(x, y) \cos\left\{\theta(x, y) + \frac{2\pi \times n}{N}\right\} + I_b(x, y) \quad (1)$$

ここで $I_a(x, y)$ はモアレ縞の振幅であり、 $I_b(x, y)$ は背景輝度、 θ はモアレ縞の位相である。 I_H と I_L をそれぞれ輝度の最大値と最小値とすると、 I_a と I_b は次式で表される。

$$I_a = \frac{I_H - I_L}{2} \quad (2)$$

$$I_b = \frac{I_H + I_L}{2} \quad (3)$$

N 枚の場合、モアレ縞の位相 θ は次式で求められる。

$$\tan \theta = -\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \quad (4)$$

$N=4$ の場合、得られた4枚のモアレ画像から位相シフト法を適用すると、図1(e)のモアレの位相分布画像が得られる。

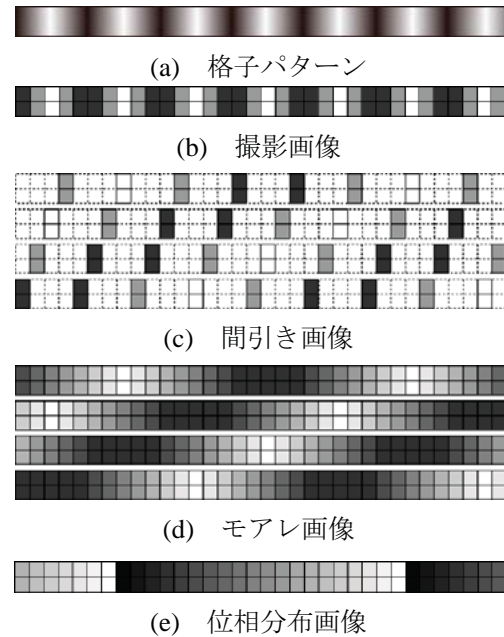
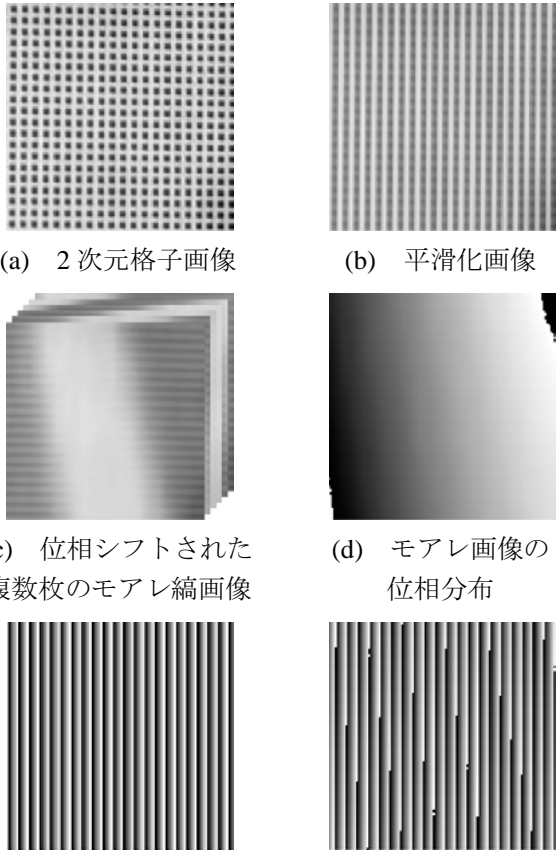


図1 サンプリングモアレ法の原理 ($N=4$ の時)

撮影対象の格子模様を2次元格子模様にすることで、2次元での変位計測が可能となる。カメラで2次元格子を撮影すると、図2(a)のような格子画像が得られる。この格子画像に対して、水平方向の変位解析の場合は縦方向の平滑化、垂直方向の変位解析の場合は水平方向の平滑化を行う。平滑化を行うと図2(b)のような平滑化画像を得ることができる。得られた各平滑化画像に間引き処理と補間処理を行うことによって、図2(c)に示す複数枚のモアレ縞画像を得ることができる。これらの複数枚のモアレ縞画

像に位相シフト法を適用することによって、図 2 (d) に示す位相分布を得ることができる。次に撮影格子の位相を求めるために参照画像との演算を行う。参照画像とは、間引き間隔で位相が 1 周期となる位相分布のことである。図 2 (e) は間引き処理を行って位相を求めた図 2 (d) の参照画像である。参照画像の位相とモアレの位相分布の差から格子の位相を求めたものが図 2 (f) である。



(a) 2次元格子画像

(b) 平滑化画像

(c) 位相シフトされた複数枚のモアレ縞画像

(d) モアレ画像の位相分布

(e) 参照画像の位相分布

(f) 格子の位相画像

図 2 サンプルングモアレ法を用いた位相分布の解析

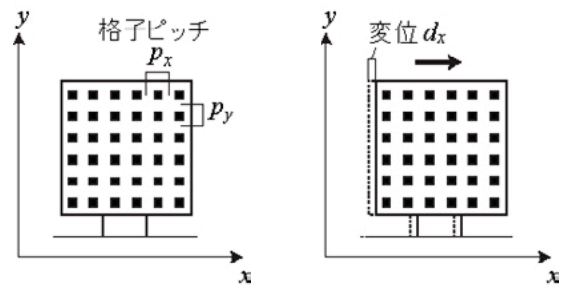
ここでサンプルングモアレ法を用いた変位計測手法の具体的な計測の流れを紹介する。まず、図 3 のように格子を貼ったターゲットを用意する。その格子画像を 1 枚撮影する。それにサンプルングモアレ法を適用し、得られた画像を変位前位相画像として記憶しておく。計測開始後、得られた画像を変位前と同様に解析し、変位後位相画像を求める。これらの画像の差をとり、位相差画像を求める。この位相差画像から、格子の 1 ピッチ(p_x, p_y)あたりの位相差($\Delta\phi_x, \Delta\phi_y$)を解析して、次式から変位 d_x, d_y を求める。

$$d_x = \frac{\Delta\phi_x}{2\pi} p_x \tag{5}$$

$$d_y = \frac{\Delta\phi_y}{2\pi} p_y \tag{6}$$

ゆえに、変位計測の分解能はターゲットに貼る格子のピッチに依存している。

また、式(5), (6)には、カメラの位置を表すパラメータが含まれない。これはカメラの位置を決めなくても変位が得られること、すなわち、キャリブレーションが不要ということを示している。格子模様さえ撮影できれば、たとえ斜め方向からでも、遠く離れていても計測を行うことができる。



(a) 変位前

(b) 変位後

図 3 ターゲットの動き

2.2 サンプルングモアレカメラ

サンプルングモアレカメラは、格子画像を撮影すると、カメラ内部で前述のサンプルングモアレ法の計算を行い、格子の位相分布と基準の位相分布との位相差分布をリアルタイムで出力することができる。内部構造は図 4 に示されるように、CMOS の撮像素子、FPGA (Field Programmable Gate Array)、メモリー、USB インターフェース、電源ユニットで構成されている。

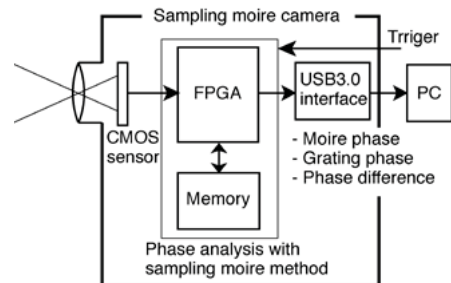


図 4 サンプルングモアレカメラの内部構成

撮影速度は撮影領域によって変わり、 2048×2048 pixels の最大サイズするとき 14 fps、 128×128 pixels の小サイズするとき 230 fps の速度で撮影し、位相分布をリアルタイムに出力することができる。また、あらかじめ撮影した基準となる格子画像の

位相分布をメモリーに保存しておき、それとの差をリアルタイムに出力することができる。基準との位相差は定数倍にすることで変位に換算が出来るので、リアルタイムに変位分布を出力するカメラと言える。

3. 建物の2方向変位計測および振動計測実験

3.1 実験装置

サンプリングモアレカメラを用いて建物の振動計測実験を行った。対象とする建物は、図5に示す13階建ての建物である。この建物は、建物側面内側に取り付けられている非常階段の手すり付近からの隙間が1階から13階天井まで見通せる構造になっている。そこで、図6に示すように13階の天井に2次元格子のターゲットを取り付け、それを撮影できるように、1階部分に上向きにサンプリングモアレカメラを固定した。これにより、1階部分に対して、13階の天井の変位量が計測できるようになる。カメラのレンズ先端から2次元ターゲットまでの距離は51.5mである。ここで、建物の東西方向を x 方向、南北方向を y 方向とする。



図5 計測する建物

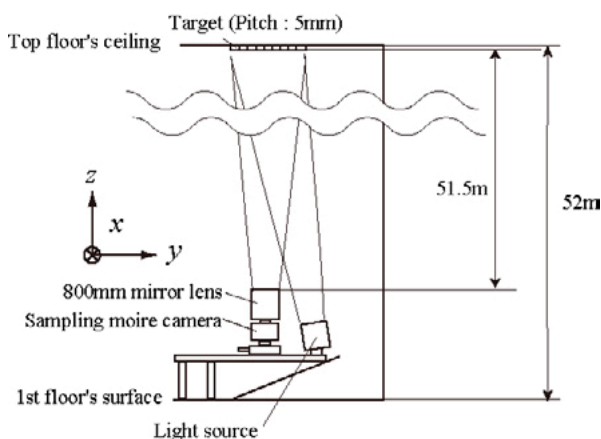


図6 構成図

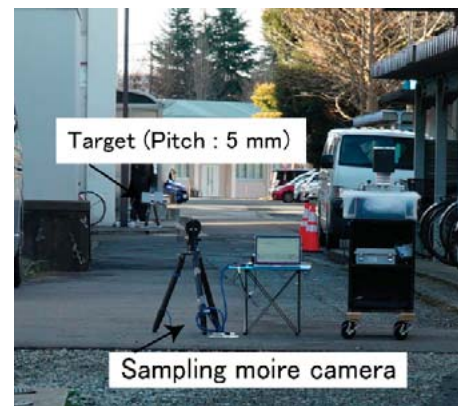
3.2 計測精度確認実験

まず、屋外で同じ距離に設定し、変位計測を行うことで使用するサンプリングモアレカメラによる変位計測の計測精度の確認を行った。

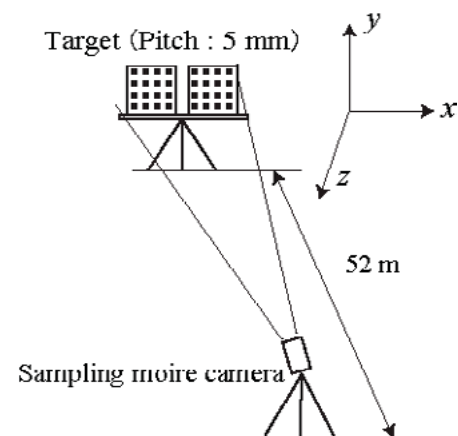
図7(a)に実験の様子を示す。サンプリングモアレカメラからターゲットの2次元格子までの距離は52mとした。サンプリングモアレカメラには、焦点距離800mmの反射型の望遠レンズを取り付けた。5.0mmピッチのターゲットの2次元格子は x 方向に移動するステージの上に取り付けられており、遠隔制御で変位させることができる。

撮影速度25fpsで30秒間撮影した。撮影開始時から約10秒間は静止し、10秒後にアクチュエータを用いて右側のターゲットに変位1.000mmを与える。左側のターゲットには変位を与えない。アクチュエータは計測開始から約10秒後に動かし始め、10秒間にステージを動かす。変位の結果は右側のターゲットの変位から左側のターゲットの変位を引いたものを示す。この操作を行うことで、カメラ側の揺れによる変位を除去することができる。

撮影した画像から256×256画素の領域を切り出して、変位の解析を行った。結果を図8に示す。



(a) 実験の様子



(b) 構成図

図7 精度確認実験

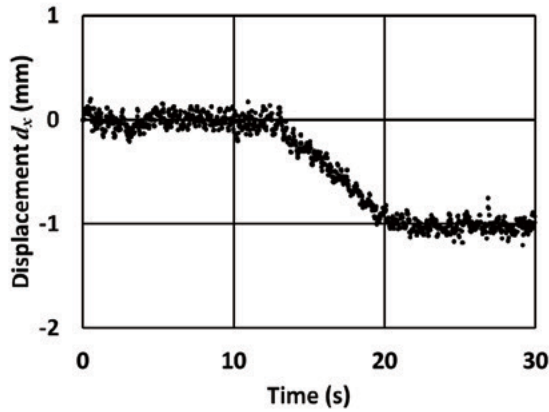


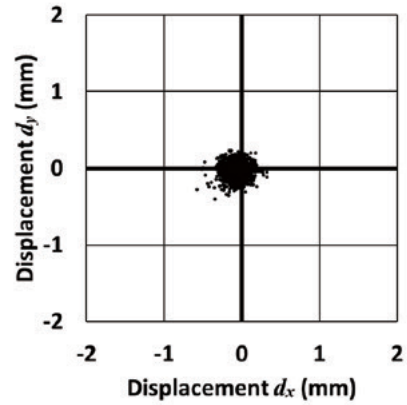
図8 精度実験での x 方向の変位

このとき、標準偏差は動かす前は 0.065 mm、動かしたあとは 0.053 mm となり、 0.100 mm 以内に収まっており、真値とのずれも 0.025 mm 以内に収まっている。これらの結果から、 52 m 離れた距離での計測は精度よくできていることがいえる。精度確認実験で得られた結果をもとに、建物の揺れの計測を行った。

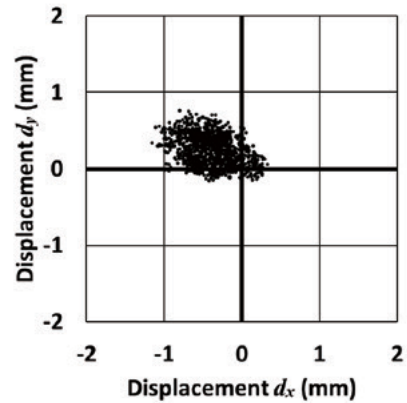
3.3 建物の変位計測実験

この状態で、台風が通過した日に計測実験を行った。撮影条件として、撮影時間 300 s、撮影速度 4 fps、画像サイズ 256×256 pixel、格子間画素数 15 pixel、平滑化 15 pixel、間引き数 15 pixel とした。露光時間は風速 $4.0 \sim 10.0$ m/s、 $2.0 \sim 7.0$ m/s の時、 15 ms とした。また、別の穏やかな天気の日にも同様の計測実験を行った。このときは、風速 $0.0 \sim 1.5$ m/s の時に 10 ms とした。

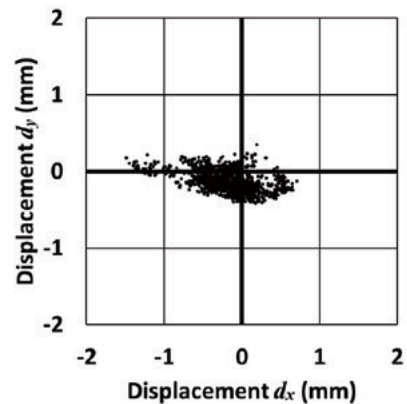
建物天井に貼り付けた格子は計測した建物に対して 4 度傾いていたため、その分の補正を行うことで x 方向と y 方向の変位をそれぞれ求めた。図9に風速が異なる時の計測された変位を示す。図9は、横軸に x 方向、縦軸に y 方向の変位をプロットしたものである。これらの結果より、風速が大きい方が変位は大きくなることがわかる。同様の計測実験を3回ずつ行ったが、それぞれ同様の傾向が見られた。さらに、揺れが大きい場合には、 x 方向（東西方向）に大きく揺れていることも確認できる。 y 方向（南北方向）の変位と比べて、 x 方向の変位の振幅が大きいことについて、 x - z 面(南側と北側)には窓が多く、 y - z 面には建物の内部に丈夫な壁部分が多いことが原因と考えられる。



(a) 風速 $0.0 \sim 1.5$ m/s



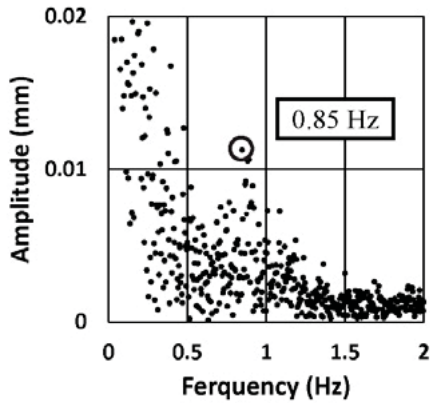
(b) 風速 $2.0 \sim 7.0$ m/s



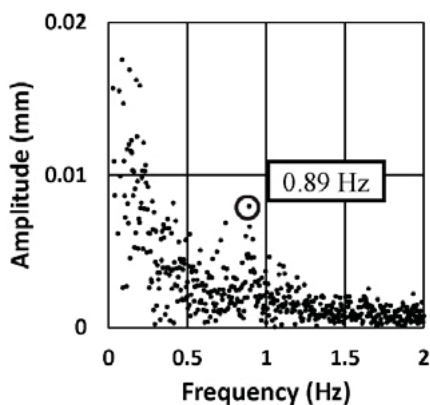
(c) 風速 $4.0 \sim 10.0$ m/s

図9 建物の変位 d_x - d_y

次に得られた時系列のデータを元にして、フーリエ変換によって周波数解析を行った。結果を図10に示す。 x 方向の場合は 0.85 Hz、 y 方向の場合は 0.89 Hz にピークが現れた。この建物の設計上の固有周期（完成時）は、 x 方向に 1.001 秒、 y 方向に 1.133 秒であり^[1]、それぞれ固有振動数に換算すると、 x 方向に 0.999 Hz、 y 方向に 0.883 Hz となる。これらの値と比較すると、それぞれ近い値が得られていることがわかる。



(a) x 方向



(b) y 方向

図 10 風速 4.0 ~ 10.0 m/s の時の
周波数解析結果

4. 結 言

本研究では、精度確認実験で距離 52 m 地点に設置したターゲットを 1 mm 動かした際、標準偏差 0.1 mm 以内での精度を確認することができた。その結果に基づき、サンプリングモアレカメラを風の影響による建物の振動の計測に適用し、東西方向と南北方向の建物の振動を確認することができた。変位結果を見ると、y 方向と比べて x 方向の変位の振幅が大きくなっていた。これは、計測した建物は、x-z 面には窓が多く、y-z 面には丈夫な壁が多いことが原因と考えられる。また、計測データからもフーリエ変換を行うことで、建物の 2 方向の固有振動数が読み取れ、設計値と近い固有振動数になっている。

今後として、風の影響で揺れているのは確認できたので、建物の振動と風の関係性がリアルタイムで分かるシステムへ改良していく必要が有る。

謝 辞

本研究は、NEDO のインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトとして行った。また、計測対象の建物に関する助言をいただきました福井大学学術研究院工学系部門の小林克巳特命教授および建物の設計資料のご提供とご説明をいただきました福井大学環境整備課環境施設係長三上高義氏に感謝いたします。その他、ご協力いただきました関係諸氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 田崎忠行：土木研究所資料 構造物メンテナンス研究センター設立記念講演会 講演概要集，25-38 (2009).
- [2] 小西真治：土木学会論文集 F, 64-4, 369-380 (2008).
- [3] 松田浩, 伊藤幸広：実験力学, 11-3, 161-170 (2011).
- [4] 李志遠, 藤垣元治：よくわかる実験技術・学術用語第 2 版, 格内敏, 加藤健司, 加藤章, 新川和夫 編, 日本実験力学学会, 44-47 (2012).
- [5] S. Ri, M. Fujigaki and Y. Morimoto: Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, *Experimental Mechanics*, 50-4, 501-508 (2010).
- [6] 藤垣元治, 原卓也：検査技術, 18-11, 8-14 (2013).
- [7] 新井泰彦, 白木万博, 山田朝治, 横関俊介：光学, 25-1, 42-47 (1996).
- [8] Y. Arai, S. Yokozeki, K. Shiraki, and T. Yamada, H : *Journal of Modern Optics*, 44-4, 739-751 (1997).
- [9] 藤垣元治, 原卓也, 生駒昇, 村田頼信：実験力学, 12-3, 35-40 (2012).
- [10] M. Fujigaki, Y. Sasatani, A. Masaya, H. Kondo, M. Nakabo, T. Hara, Y. Morimoto, D. Asai, T. Miyagi, and N. Kurokawa : *Applied Mechanics and Materials*, 83, 48-53 (2011).
- [11] 福井大学総合研究棟 (仮称) 新営工事構造概要書, 12 (2000).