

引張試験によるサンプリングモアレ法の ひずみ測定の有効性確認

飯田伊佐務^{*1} 佐藤 浩幸^{*2} 中島 富男^{*3}
Iida Isamu Sato Hiroyuki Nakajima Tomio
 李 志遠^{*4} 津田 浩^{*5}
Ri Shien Tsuda Hiroshi

構造物の変位やひずみ計測の手法として画像解析による手法が注目され、サンプリングモアレ法による測定が実用化に向けて研究・開発されている。構造物の微小変位やひずみを高精度で測定でき、サンプリングモアレ法の有効性および材料の引張試験へ適用できる可能性があることを確認した。

キーワード：サンプリングモアレ、ひずみ、格子、引張試験

1. はじめに

構造物の変形状態を計測する手法として、一般に構造物にひずみゲージを貼付する方法やレーザ変位計による測定が広く普及している。これらは点計測手法であり、構造物全体の変形の全容を知るためには多数のひずみゲージを貼付し、全てのひずみゲージについてキャリブレーションを取る必要があるなど、多大な費用と労力を必要とする。

近年では、画像処理技術を利用し、簡便に構造物の変形状態を計測できる手法の研究が数多く進められている。そのような計測手法の一つとして、サンプリングモアレ法が注目されている⁽¹⁾。(モアレ：干渉縞)

サンプリングモアレ法に関する既往の研究⁽²⁾⁽³⁾

では、曲げ試験や運用中の橋梁で計測された事例が報告されているが、サンプリングモアレ法による計測精度を構造材料の弾性域から破断するに至るまで、ひずみゲージなどと定量的に比較した例は少ない。

構造材料の変形を容易に再現可能な一般的手法は、引張試験である。しかし、引張試験において、材料の弾性域から塑性域さらに破断に至るまでの変形を一貫して計測することは容易ではない。

引張試験は試験片に軸方向の荷重を加えることにより試験片が伸び、最後には破断する。この時の応力（荷重を試験片の断面積で除したもの）とひずみ（試験片が伸びた長さを標点距離で除したもの）の関係をグラフに描くと図1のようになる。一般的な炭素鋼では、破断までのひずみは25%程度である。

*1：計測事業部 材料試験部 福浦グループ

*2：計測事業部 材料試験部 福浦グループ 課長

*3：研究開発センター 研究開発グループ 課長

*4：独立行政法人 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造物画像診断グループ 主任研究員 博士(工学)

*5：独立行政法人 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 構造物画像診断グループ グループ長 工学博士

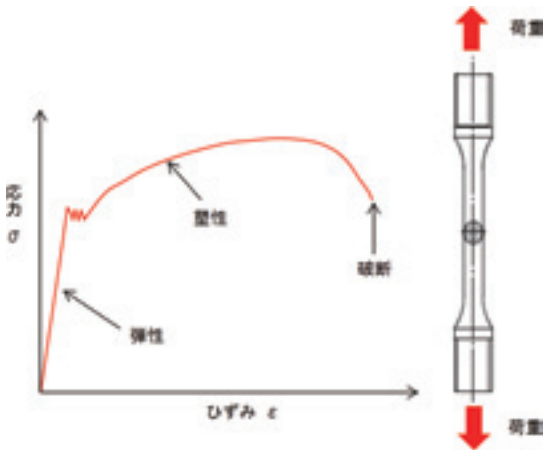


図1 応力-ひずみ曲線

引張試験においてひずみを計測する手法としては箔ひずみゲージや伸び計が利用される。箔ひずみゲージによる計測可能な範囲は5%程度と狭いため、塑性域や破断まで計測できない。20%程度のひずみまで計測できる大ひずみ用のひずみゲージを使用すれば、塑性域や破断までひずみを計測できるが、塑性域では試験片の変形（絞り）が大きくなり、ひずみゲージが試験片から剥離することがしばしばある。伸び計の場合には破断までの変位量を計測できるが、精度が低く、弾性域内のデータの信頼性は低い。

一方、サンプリングモアレ法は、広範囲の領域の撮影画像を画像処理することによって変位を求めるため、原理上、ひずみゲージや伸び計のように測定範囲が限定されることはない。したがってサンプリングモアレ法によるひずみ計測精度が箔ひずみゲージと同等であれば、弾性域から塑性域、および、破断までの材料変形を一貫して計測可能となる。さらに、材料試験により確認された計測精度を反映することにより、多数のひずみゲージや計測装置により行われていた大型構造物のひずみ計測が容易になると期待されている。

このような背景の下、本稿では、引張試験へのサンプリングモアレ法の適用性を実験的に検討した結果について報告する。

2. サンプリングモアレ法の計測原理⁽¹⁾

サンプリングモアレ法は、図2のように撮影した1枚の格子画像に対してサンプリングのスタート点を変えながら一定の間引き間隔でダウン・サンプリングと輝度補間処理を行い、得られる複数枚の位相がシフトされたモアレ縞画像から格子の位相分布を求める空間的な位相解析手法である。

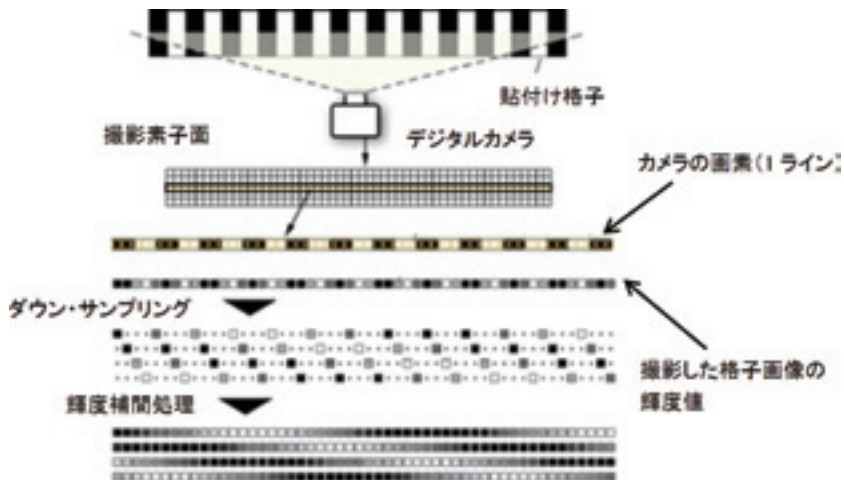


図2 サンプリングモアレ法の原理⁽⁴⁾

デジタルカメラで撮影した格子ピッチが P の格子画像の輝度値分布を数式に示すと式 (1) のようになる。

$$I(x, y) = I_a(x, y) \cos \left[2\pi \frac{x}{P} + \varphi_0(x, y) \right] + I_b(x, y) \quad (1)$$

$I_a(x, y)$ 、 $I_b(x, y)$ ：格子振幅、背景輝度輝度値を M 画素ごとに間引き、輝度補間処理すると式 (2) のように複数枚のモアレ縞画像が得られる。

$$I_{Moire}(x, y; m) = I_a(x, y) \cos \left[2\pi \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{M} \right) x + \varphi_0(x, y) + 2\pi \frac{m}{M} \right] + I_b(x, y) \quad (2)$$

($m=0, 1, 2 \dots, M-1$)

$\left(\frac{1}{P} - \frac{1}{M} \right)$ ：モアレ縞の空間周波数

また、式 (3) に示すように、位相シフト法を用いて離散フーリエ変換により、位相を決定できる。

$$\varphi_{Moire} = -\tan^{-1} \frac{\sum_{m=0}^{M-1} I_{moire} \sin \left(\frac{2\pi m}{M} \right)}{\sum_{m=0}^{M-1} I_{moire} \cos \left(\frac{2\pi m}{M} \right)} \quad (3)$$

式 (3) から求められるモアレの位相分布画像より、得られる格子ピッチは数百分の一までの微小変位量を検出できる。よって、元の画像の拡大現象であるモアレ縞の位相を解析することにより、これまでの画像処理手法より 1 桁高い変位計測精度を実現できる。

今回、サンプリングモアレ法を用いてひずみを解析するために、材料のひずみの発生に伴い、撮影される画像上での格子模様のピッチが変化することに注目した。ここでは、式 (2) よりモアレ縞の位相分布に格子ピッチ P が含まれていることに注目し、モアレ縞の位相を式 (4) のように i 方向に微分した。

$$\frac{\partial \varphi_m(i, j)}{\partial i} = 2\pi \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{T} \right) \approx \frac{\varphi_m(i+1, j) - \varphi_m(i-1, j)}{2} \quad (4)$$

そして式 (5) より正確な格子ピッチ P が算出可能となり、ひずみは変形前後の格子ピッチの変化から式 (6) で算出できる。

$$P(i, j) \approx \frac{4\pi T}{4\pi + [\varphi_m(i+1, j) - \varphi_m(i-1, j)]T} \quad (5)$$

$$\varepsilon_x(i, j) \approx \frac{P'(i, j) - P(i, j)}{P(i, j)} \times 1,000,000 (\mu\varepsilon) \quad (6)$$

3. 引張試験にサンプリングモアレ法を適用するための事前検討

3.1 モアレ縞発生用の格子描画方法について

はり構造にサンプリングモアレを適用する場合、変位量は大きい、材料のひずみは弾性域内である。そのため、金属やコンクリート構造であれば計測対象に発生しているひずみは小さい。しかし、金属材料の引張試験に適用すると、変位量は少ないが、25%もの大ひずみが発生する。その際の課題として考えられたのが、モアレ縞を発生させるための格子が大ひずみまで追従するかである。本稿では、表 1 に示す条件で格子描画手法の追従性を検討した。条件①はサンプリングモアレ法に一般的に利用されている手法である。一方、条件②と③は共著者である独立行政法人産業技術総合研究所の李氏より提案されたものである。格子の状況を図 3 に示す。

表1 格子作成方法

	条件①	条件②	条件③
作成方法	紙シール (市販のラベルシール)	粘着シール	レーザーマーカ
試験片への 取り付け方法	格子を印刷したシールを貼り付ける		試験片にレーザーマー カーで格子を印刷した

※格子ピッチは1mm

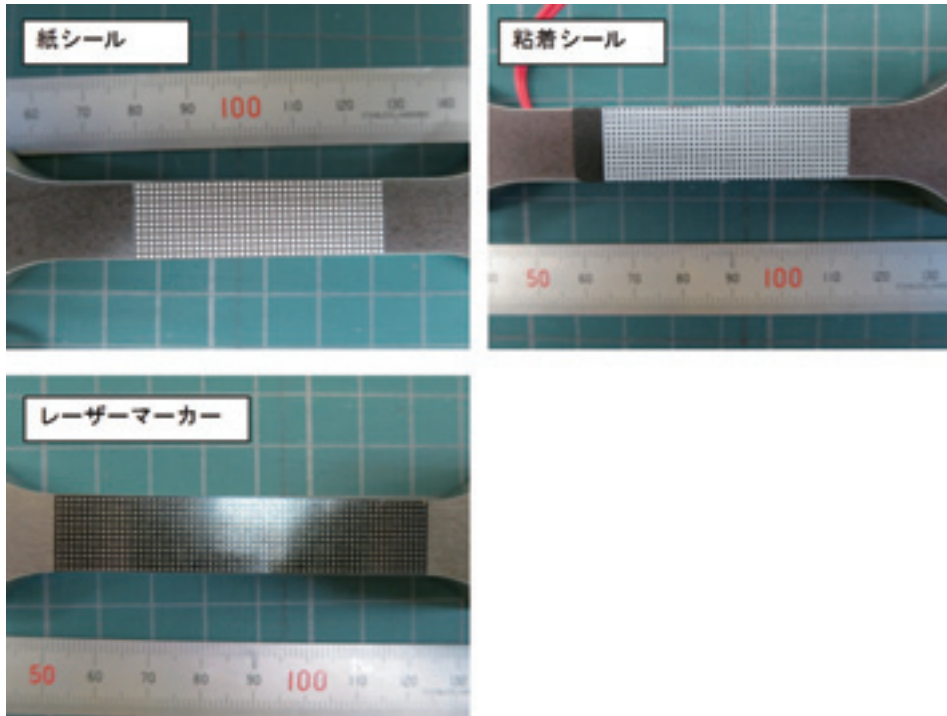


図3 格子描画状況 (引張試験前)

3.2 引張試験条件について

サンプリングモアレ法に使用されるカメラは、撮影フレームレートが高い産業用 CCD カメラを用いる手法と、民生用のデジタルカメラによる静止画を撮影する手法がある。

画像記録の原理は同じであるが、本稿では入手のしやすさや撮影機器の取扱いの容易さを考慮し、画素数の多いデジタルカメラを用いた。デジタルカメラにより引張試験の画像を撮影するにあたり、以下の課題が考えられた。

(1) 荷重信号とデジタルカメラのシャッターを

切るタイミングの同期

(2) 適切な引張試験の試験速度とデジタルカメラの撮影間隔の設定

これらの課題について予備試験を実施した結果、(1) については図4のように引張試験機のデジタル表示と試験片を共にデジタルカメラの撮影画角内に入れることとした。(2) については撮影間隔を1秒とし、引張試験速度は従来から実施している条件 (JIS Z2241 の試験速度条件) を踏襲した。

試験条件を表2にまとめて示す。引張試験機にはオートグラフ万能試験機を用い、試験片を破断



図 4 引張試験状況

表 2 試験条件

		平板試験片	丸棒試験片
試験条件	材質	SM490A	SM490A
	試験片形状	JIS Z2241 13B号試験片	JIS Z2241 14A号試験片
	試験速度	弾性域 2mm/min 塑性域(破断まで) 20mm/min	1mm/min 10mm/min
撮影条件	シャッタースピード	1/15秒	
	撮影間隔	1秒	

まで引っ張り、試験中の格子の変形状況をデジタル一眼レフカメラで撮影した。

試験片の格子マーキング面の対面にひずみゲージおよび伸び計を取り付け、サンプリングモアレ法によるデータとの比較ができるようにした。

4. 試験結果

4.1 格子描画方法の結果

表 1 に示した 3 条件の格子について、引張試験後の試験片状況を図 5 に示す。

紙シールは引っ張り途中で剥がれてしまったが、粘着シールは破断まで剥がれなかった。また、レーザーマーカは試験片表面に直接格子を描きこんでいるため、破断まで追従することができた。

ここで、紙シールが剥がれたことについては説

明を要する。図 6 に約 1cm² の紙シールを離散的に数か所試験片に貼付け、引張試験を行った時の連続写真を示す。

試験開始後 130 秒以降では、試験片中央部の紙シールが回転していることがわかる。試験片の長手方向中央部に括れが発生した。150 秒以降はシールの回転が顕著になり、160 秒では中央部の紙シールが剥離した。これは、紙シールの伸びが材料の大ひずみ変形（特に中央部では引張ひずみに加えてせん断ひずみによる変形）に追従できなかったためである。この結果から、サンプリングモアレ法に広く利用されている紙シールは、材料との粘着性の問題があり、材料が塑性域や破断に至るまでは適用できない。

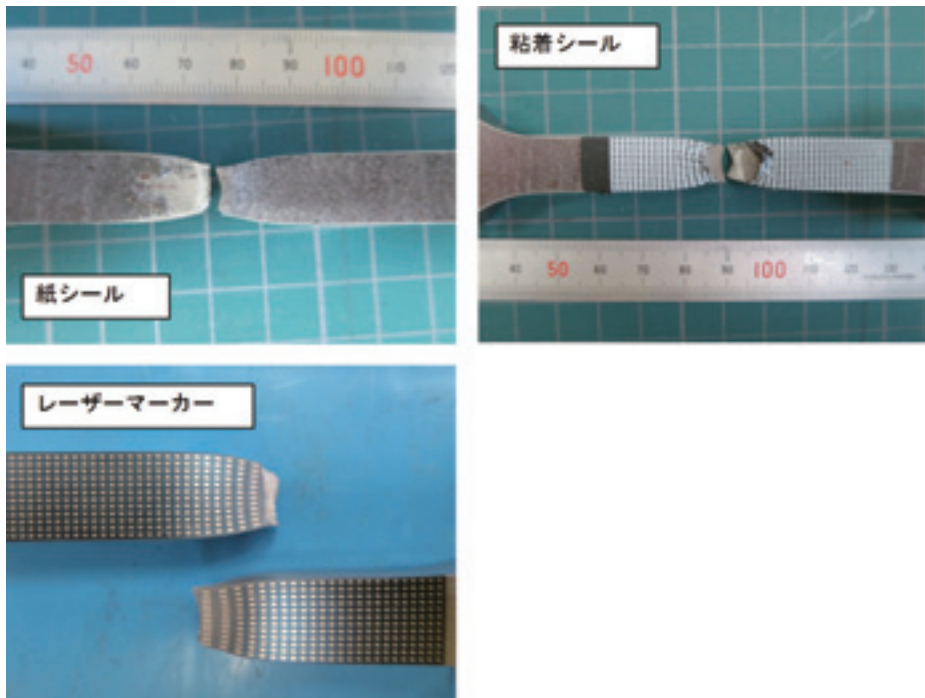


図5 格子描画状況（引張試験後）

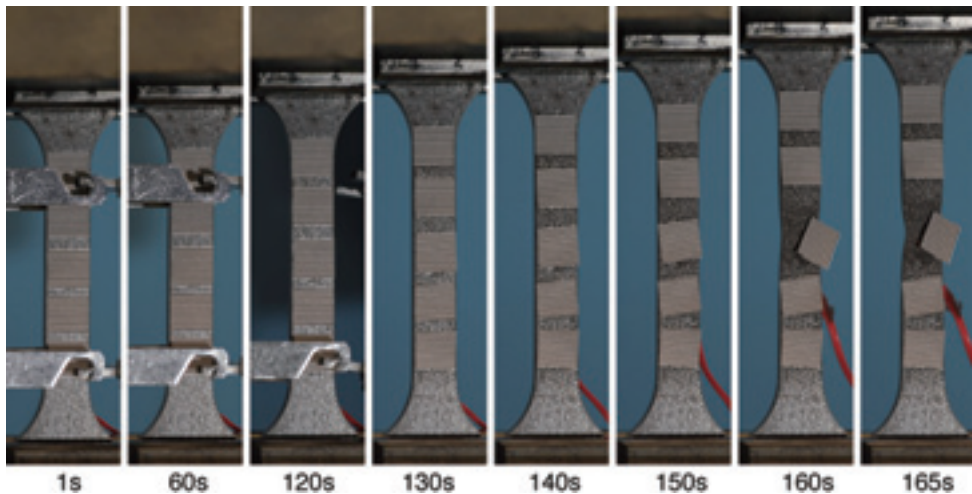


図6 紙シールの回転の様子

4.2 平板試験片での引張試験結果

図7、図8に粘着シールおよびレーザーマーカで格子を作成した時の荷重-ひずみ線図を示す。ひずみは赤枠部（150×150画素）の試験片長手方向の平均ひずみを算出した。破断までのデータが得られたことから、荷重-ひずみ線図も採取する

ことができた。

いずれの格子描画条件においても、ひずみゲージが断線するまでに得られたひずみゲージのデータとサンプリングモアレ法によるひずみの解析結果はほぼ同じであった。

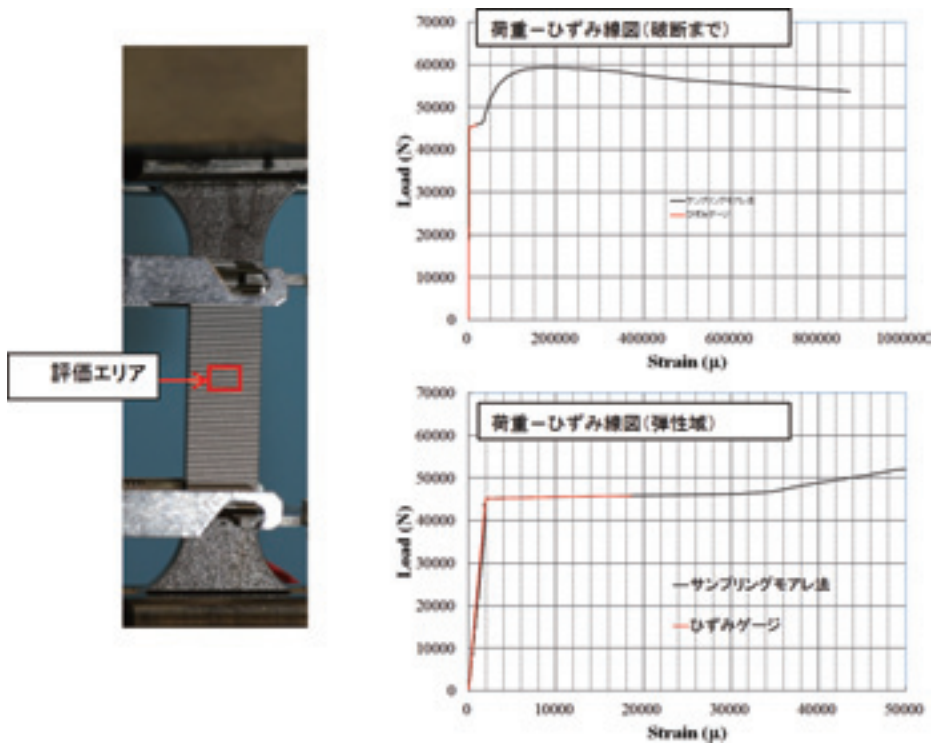


図7 荷重-ひずみ線図(粘着シール試験片)

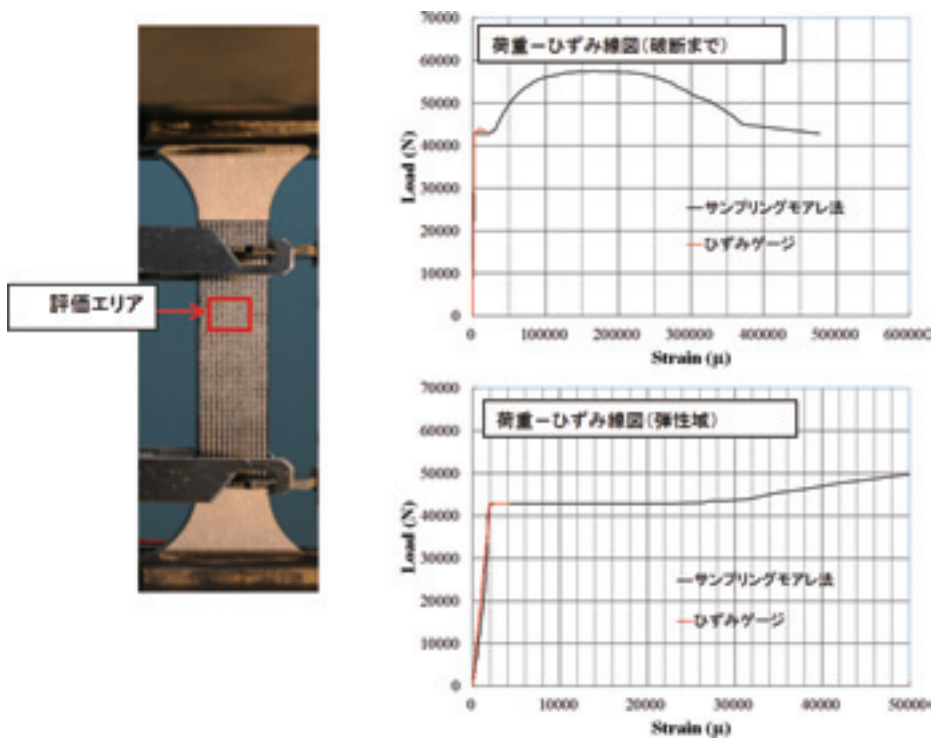


図8 荷重-ひずみ線図(レーザーマーカーク試験片)

4.3 丸棒試験片の引張試験結果

図9、図10に粘着シールおよびレーザーマーカで試験片平行部表面に格子を作成した時の荷重-ひずみ線図を示す。ひずみは赤枠部(20×100画素)の試験片長手方向の平均ひずみを算出した。

平板試験片の場合と同様に、ひずみゲージが断線するまでに得られたデータとサンプリングモアレ法によるひずみの解析結果はほぼ同等の結果が得られた。しかし、弾性域以降のデータについて

は不明確な挙動を示している。これは、平板が長手方向60mmに格子間隔が1mmなのに対し、丸棒は長手方向30mmに格子間隔が1mmと試験片の大きさに対して描画した格子間隔が大きいため、ひずみ演算上の精度に差が出たと考えられる。より狭い格子間隔を描画し、ひずみ演算のための空間平均点数を増やすなどの工夫により改善可能と考えられる。

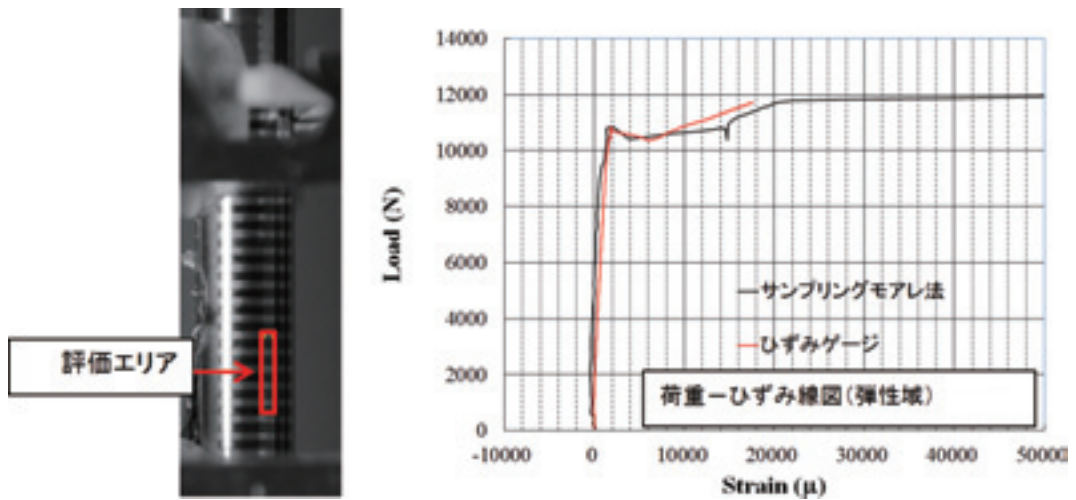


図9 荷重-ひずみ線図 (粘着シール試験片)

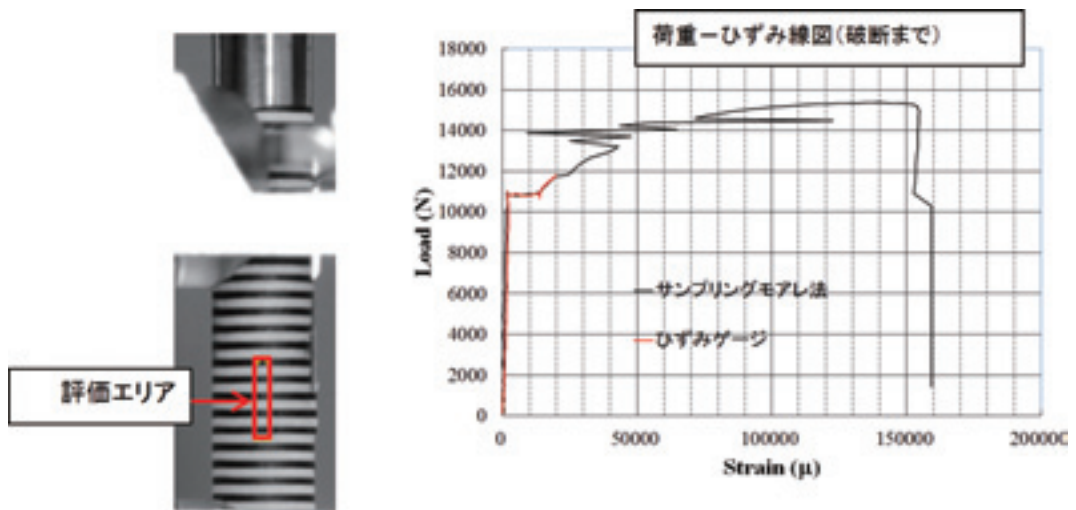


図10 荷重-ひずみ線図 (レーザーマーカ試験片)

5. まとめ

引張試験片の変形部における格子ピッチの変化を、サンプリングモアレ法でひずみ解析を行った結果、弾性領域では試験片形状によらずひずみゲージと同等の結果が得られた。

本稿では、ひずみの評価を試験片に描画した格子の一部分に留めたため、今後、試験片全体で評価を可能にすることにより本手法でひずみゲージと同じくらいの精度のひずみ計測が広範囲できるようになり、構造材の微小変位計測が現実的なものになると考えられる。

また、リアルタイムでのデータ解析を求められることも考えられるが、現状ではその段階まで達していない。これに対応できるインターフェイスおよびソフトウェアの開発が今後の重要な課題である。

参考文献

- (1) 李志遠、津田浩：高精度高速全視野変位計測法の開発、検査技術 Vol.18 No.9、2013、pp.31-36
- (2) 森本吉春、藤垣元治、梶谷明大：サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測、Journal of Vacuum Society of Japan、Vol.54 No.1、2011、pp.32-38
- (3) 玉井博貴、生駒昇、原卓也、藤垣元治：サンプリングモアレ法による土木構造物の変位・変位角・振動数等の計測、建設コンサルタンツ協会近畿支部 第46回研究発表会論集 構造系 No.112-1、2013
- (4) <https://unit.aist.go.jp/riif/structid/heni.html>



計測事業部
材料試験部
福浦グループ
飯田 伊佐務

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



計測事業部
材料試験部 福浦グループ
課長
佐藤 浩幸

TEL. 045-791-3519
FAX. 045-791-3542



研究開発センター
研究開発グループ
課長
中島 富男

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



独立行政法人産業技術総合研究所
計測フロンティア研究部門
構造物画像診断グループ
主任研究員 博士(工学)
李志遠

TEL. 029-849-1065
FAX. 029-861-5881



独立行政法人産業技術総合研究所
計測フロンティア研究部門
構造物画像診断グループ
グループ長 工学博士
津田 浩

TEL. 029-861-9284
FAX. 029-861-5881