

サンプリングモアレ法を用いた変位計測システムの導入

宮下 和大^{*1} 倉内 友己^{*2} 郡 亜美^{*2}
Miyashita Kazuhiro Kurauchi Yuki Kohri Ami

近年、非接触で変位計測が可能な一手法として、サンプリングモアレ法が注目されている。当社は2018年度に変位計測装置のサンプリングモアレカメラを導入した。本稿では、サンプリングモアレ法の概要と確認試験の結果を紹介する。

キーワード：サンプリングモアレ、変位計測、非接触、画像解析、位相解析

1. はじめに

サンプリングモアレ法は、測定対象物に張り付けた格子ターゲットをカメラで撮影することで変位を計測する手法である⁽¹⁾。さらに、複数の格子ターゲットを同時撮影することで、複数点同時に変位を計測することも可能である。また、従来の接触式変位計に比べ、計測箇所での計測器の設置が不要であり、配線作業の簡素化などが可能である。本稿では、このサンプリングモアレ法の概要と確認試験の結果を紹介する。

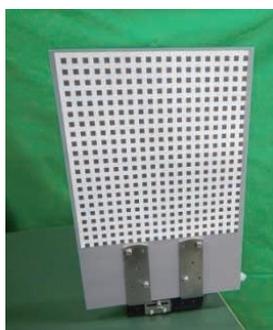
2. サンプリングモアレ法の概要

今回用いた共和電業社製のサンプリングモアレカメラ (DSMC-100A) の外観と格子ターゲットを図1に示す。

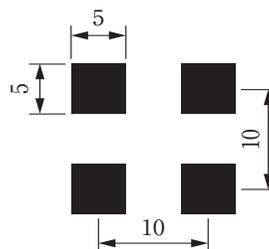
サンプリングモアレ法では、撮影した参照格子(変形前)と変形格子を重ねることで発生するモアレ縞^{じま}を利用して、高精度で変位を測定する手法である。モアレ縞とは規則正しい繰り返し模様^{じま}の周期のずれにより発生する縞模様のことである⁽²⁾。モアレ縞の例を図2に示す。



(a) サンプリングモアレカメラ
(本体)



(b) 格子ターゲット
(格子間隔10mm)



(c) 格子ターゲット模式図

図1 サンプリングモアレカメラおよび格子ターゲット外観

*1：研究開発センター 研究開発グループ

*2：計測事業部 計測技術部 礫子グループ

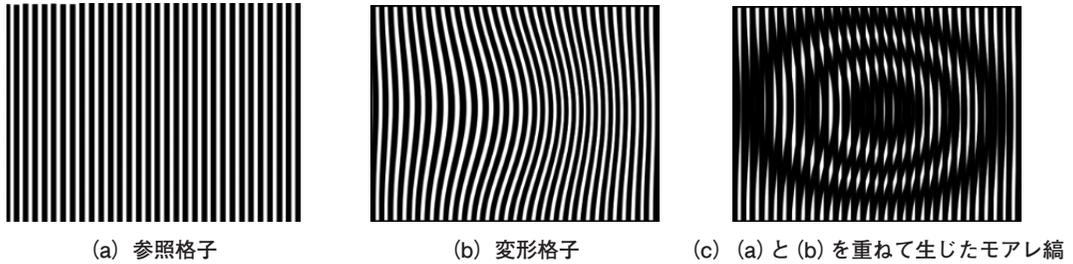


図2 モアレの発生例

サンプリングモアレカメラで撮影した1枚の格子画像に対して、参照格子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を行い、モアレ縞を発生させる。次にモアレ縞間の輝度補間処理を行い、モアレ縞にグラデーショナルをかけて波形データとする。そして、取得したモアレ縞の濃淡を波に見立て、モアレ縞を位相解析することで変位を求めることができる。そのため、格子模様の微細な変形をモアレで表現することで大きな位相差として捉えることができ、格子ターゲットのピッチの1/100～1/1000程度の精度で変位を計測することが可能である⁽³⁾。また変位の算出には、撮影した画像をピクセルごとで演算を行い、格子に相当する部分の平均値を格子ターゲットの変位量として出力している。そのため、画像撮影の際に生じるショットノイズなどの影響を少なくし、良好な繰り返し精度を有している。サンプリングモアレカメラの基本構成を図3に示す。

サンプリングモアレカメラはカメラ内部でのCMOSセンサ(光を電気信号に変換)とDSP(デジタル信号)処理によって画像の高速撮影(最大

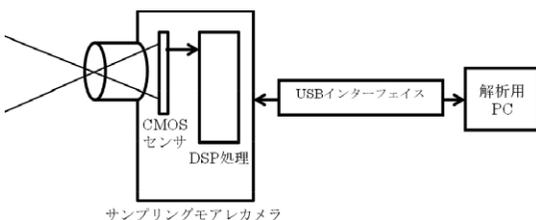


図3 サンプリングモアレカメラの基本構成

500fps以上)が可能であり、動的変位の計測にも適用できる。

3. サンプリングモアレ法の確認試験

サンプリングモアレ法を用いた計測結果の一例を紹介する。サンプリングモアレ法の分解能は、格子ターゲットのピッチおよび位相差の計算エリアの大きさに依存する。実計測においては、主な誤差要因は、対象と計測器間の温度差による空間の揺らぎやカメラを据え付けた床面の振動などの外乱が挙げられる。ここではサンプリングモアレ法で標準的な図1(b)で示した格子ターゲットを用いて、変位計測と振動計測した結果を述べる。

3.1 カメラと計測対象の距離と精度の関係

カメラと格子ターゲットの距離を5m、10m、30m、60m、100mと変化させ、距離の影響を調査した。また、計測する時間帯による計測値の影響を調べるために昼間と夜間で計測した。試験方法は、格子ターゲットを取り付けた1軸ステージを用い、横方向に1mmの変位を与えた。サンプリング周波数は15Hzとし、計測値は3秒間の平均値とした。計測に用いた格子ターゲットを図4に、計測時の状況を図5に示す。

夜間は周囲が暗く、サンプリングモアレカメラで格子模様を識別できないため、計測位置から白色ホロライトを用いて格子ターゲットに照射した。計測結果を図6に示す。

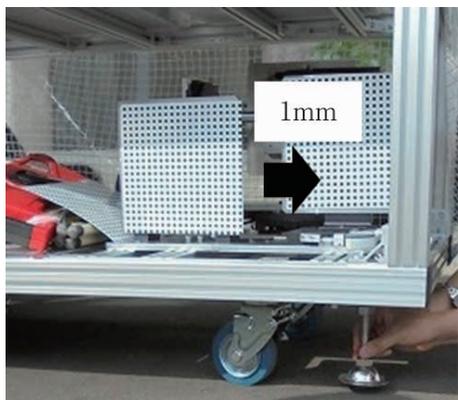


図4 計測用格子ターゲット (10mm ピッチ)



(a) 昼間計測状況 (10m)



(b) 夜間計測状況 (10m)

図5 計測状況

図6より、すべてにおいて、格子ピッチの1/100にあたる0.1mm以下の計測精度が確保されていることがわかる。また、それぞれの距離で静止状態(変位0mm)における計測データのふらつきを確認するため、サンプリング周波数15Hzで10秒間計測したときの標準偏差を求めた。結果を表1に示す。

表1より、格子ターゲットとの距離が長くなるに従い標準偏差が大きくなる傾向が確認できる。昼間と夜間の違いについては、10m以下の計測条件では双方に大きな違いが見られなかったものの、30m以上の計測条件では昼間の方がより標準偏差が大きくなる結果が得られた。この要因としては、昼間は地面が温められ空気の揺らぎが生じやすく、撮影した像が揺らぐためと考えられる。また、格子ターゲットまでの距離が長くなるにつれ空気の揺らぎの影響を大きく受けるため、長距離ほど標準偏差が大きくなったと予測される。

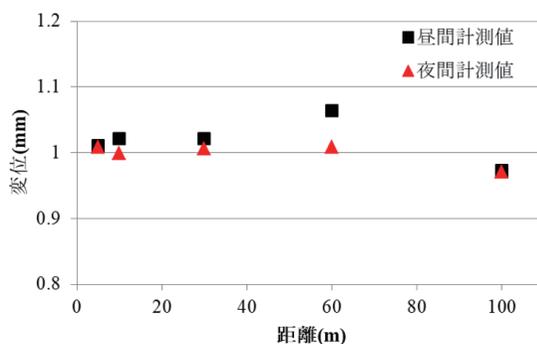


図6 各計測距離における変位量

表1 各計測条件における標準偏差

計測距離(m)	昼間計測時の標準偏差(mm)	夜間計測時の標準偏差(mm)
5	0.004	0.007
10	0.010	0.009
30	0.055	0.029
60	0.146	0.108
100	0.228	0.142

3.2 格子ターゲットに対する角度の影響

通常、計測対象の正面からターゲットを狙えるような好条件は少なく、計測対象のターゲット面の正面の方向から角度を持って計測することになる。ここでは図7に示す加振装置で片持ち梁^{はり}のH鋼を加振させ、それを対象にカメラ2台による同時計測を行い、角度が計測精度に及ぼす影響を確認した。図8に格子ターゲット(10mmピッチ)とサンプリングモアレカメラの位置関係を示す。

カメラはH鋼の正面(カメラ1)および斜め30°(カメラ2)の方向に設置し、変位を計測した。加振開始時からの変位の比較を図9に示す。

図9より各設置条件において、ピーク値を記録した時刻が一致しており、2つのカメラ間で同期が精度よく取られている。また、第一波の変位量の差異が格子ピッチの1/100である0.1mmに比べ0.02mmと十分に小さい。これより、計測において格子ターゲットと格子を撮影するサンプリングモアレカメラの角度はかならずしも垂直である必要はないと考えられる。

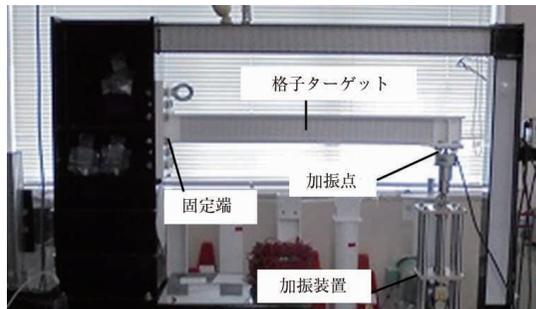


図7 加振装置外観

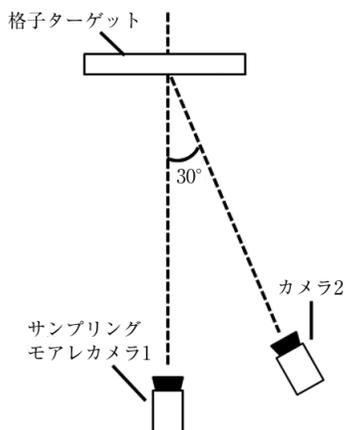


図8 格子ターゲットとカメラの位置関係

3.3 格子ターゲットを橋梁ボルト部分とした場合の計測結果

通常、サンプリングモアレ法では、格子ターゲットを測定対象物に張り付ける必要がある。しかし、橋梁に格子ターゲットを張り付けるには、足場を組むなど手間や費用がかかってしまう。そこで、橋梁の中にある規則性を持つ模様を利用して、格子ターゲットの張り付けなしで変位測定可能かを検討した。今回は、橋梁の桁部にある規則正しく並んだボルト集合部に着目し、ボルト集合部を格子ターゲットとして測定し、精度を確かめた。

試験方法は、橋梁の桁を模擬したボルト集合部を取り付けたH鋼の3点曲げとした。H鋼の模式図を図10に示す。

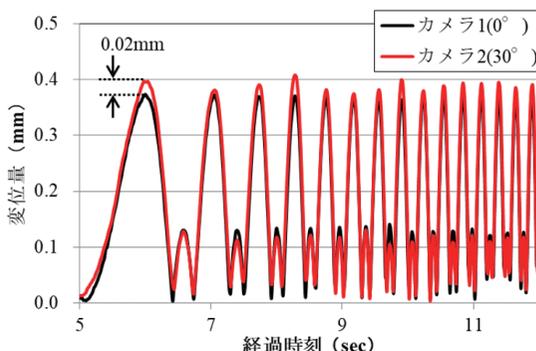


図9 同期計測による変位計測値の比較

H鋼の全長は6m、支点間距離は5mである。ボルト集合部は、図10に示す $x=0\text{mm}$ (H鋼中央)、 $x=-1250\text{mm}$ 、 $x=2250\text{mm}$ の位置に3カ所取り付けられた。また、比較として、10mmピッチの格子ターゲットを $x=1250\text{mm}$ の位置に1カ所取り付けられた。

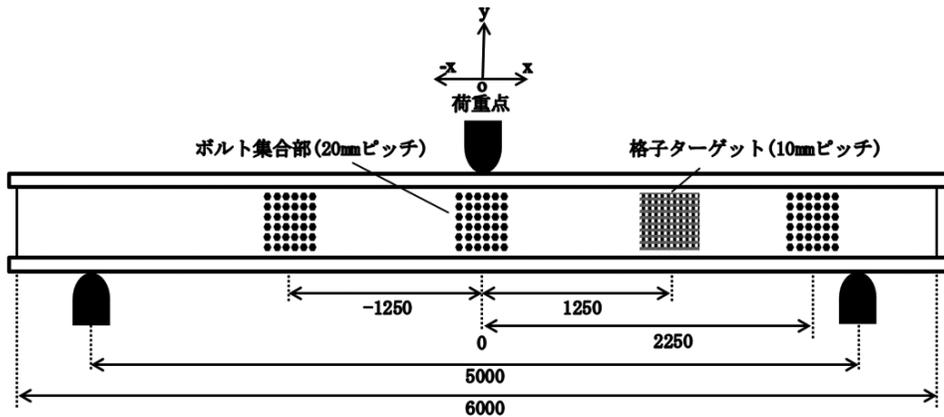


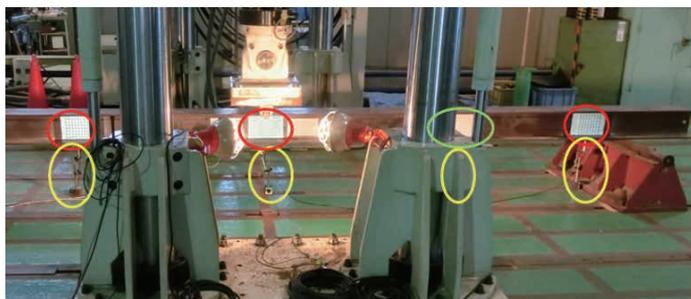
図 10 H 鋼模式図

サンプリングモアレ測定の結果を評価するために、ボルト集合部や格子ターゲットの下に接触式変位計を取り付けた。図 11 に 3 点曲げ試験状況を示す。

ボルト集合部の拡大図を図 12 に示す。本試験で対象とした六角ボルトは径を 10mm、ボルト間のピッチを 20mm とした。ボルトの個数は 8×8 個とした。

H 鋼中央に 2kN、15kN、30kN を載荷する静的荷重試験を行った結果を図 13 に示す。

図 13 から載荷荷重のいずれに対しても、ボルト集合部のサンプリングモアレ法による計測結果と接触式変位計の測定結果がよく一致し、両者の差がボルト間ピッチの 1/100 である 0.2mm 以内に収まっていることが確認できた。また、ボルトと



- : ボルト集合部
- : 格子ターゲット
- : 変位計

図 11 3 点曲げ試験状況

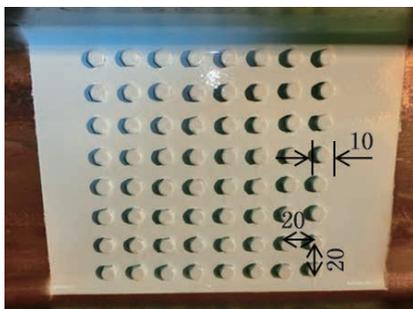


図 12 六角ボルト集合部 (8×8 個)

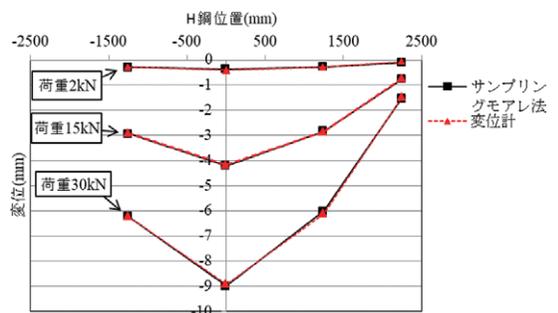


図 13 静的荷重試験結果

格子ターゲットの精度にはほとんど差はなかった。このことから、ボルト集合部をターゲットとして用いることで、静的な変位が計測可能であることを確認した。

次に、載荷荷重を 8kN とし、加振周波数 3Hz で振動させる動的荷重試験を行った。H 鋼中央部での計測結果を図 14 に示す。

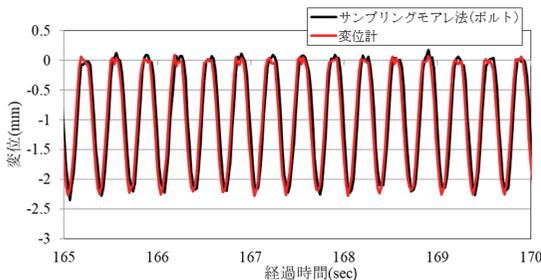


図 14 動的荷重試験結果（試験周波数 3Hz、載荷荷重 8kN）

サンプリングモアレ法および接触式変位計での図 14 に示す変位量、周波数がよく一致していることが確認できた。また、図 14 の結果を高速フーリエ変換 (FFT) 解析すると両者の周波数はともに 3.0Hz であり、加振周波数の 3Hz と一致した。これらのことからボルト集合部をターゲットとして用いても、静的な変位だけでなく動的な変位に対しても計測が可能であることを確認した。

4. おわりに

今回は確認試験における計測結果を紹介した。サンプリングモアレ法はカメラの撮像範囲であれば非接触で複数点の計測が可能であり、今後大型構造物の変位計測に幅広く適用できることが期待される。

参考文献

- (1) Fujigaki, Morimoto : Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, Experimental Mechanics, Vol.50, No.4, 2010, pp.501-508
- (2) 森本、藤垣、柗谷：サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測、日本真空学会、54 巻 1 号、2011、pp.32-38
- (3) 藤垣、原、生駒、村田：列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用、実験力学、Vol.12、No.3、2012、pp.179-184



研究開発センター
研究開発グループ
宮下 和夫
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部
計測技術部
磯子グループ
倉内 友己
TEL. 045-759-2085
FAX. 045-759-2119



計測事業部
計測技術部
磯子グループ
郡 亜美
TEL. 045-759-2085
FAX. 045-759-2119