

第47回地盤工学研究発表会

モアレを利用した変位計測
システムの開発
(計測原理と画像解析)

平成24年7月15日

山形設計(株)

技術部長 堀内 宏信

1. はじめに

■ ひびわれ計測の必要性

高度成長期に建設された社会基盤の多くが老朽化を迎え、また近年多発している地震などの災害により、何らかの損傷を有する構造物は膨大な数に上ると想定される。

老朽化による劣化や外的要因による損傷などが生じた構造物の適切な維持管理による健全性の確保と長寿命化のためには、変位やひび割れなどのモニタリングが重要となる。

このような変位やひび割れなどの微小変位を対象として、モアレを利用して離れた地点から画像撮影により現場計測を行う簡易な変位計測システムの開発を行った。

2. システムの概要

■ 基本原理

離れた地点からの画像撮影による変位計測を実現するために、モアレ（moiré）の特性に着目した。

モアレとは、周期性のある直線群や曲線群などのパターンを重ね合わせた時に、パターン同士の光学的な干渉により発生する縞模様のことである。

モアレを利用すると、パターン同士の微小な相対変位をモアレの移動量として大きく拡大することができるので精密加工の分野などで広く利用されている。

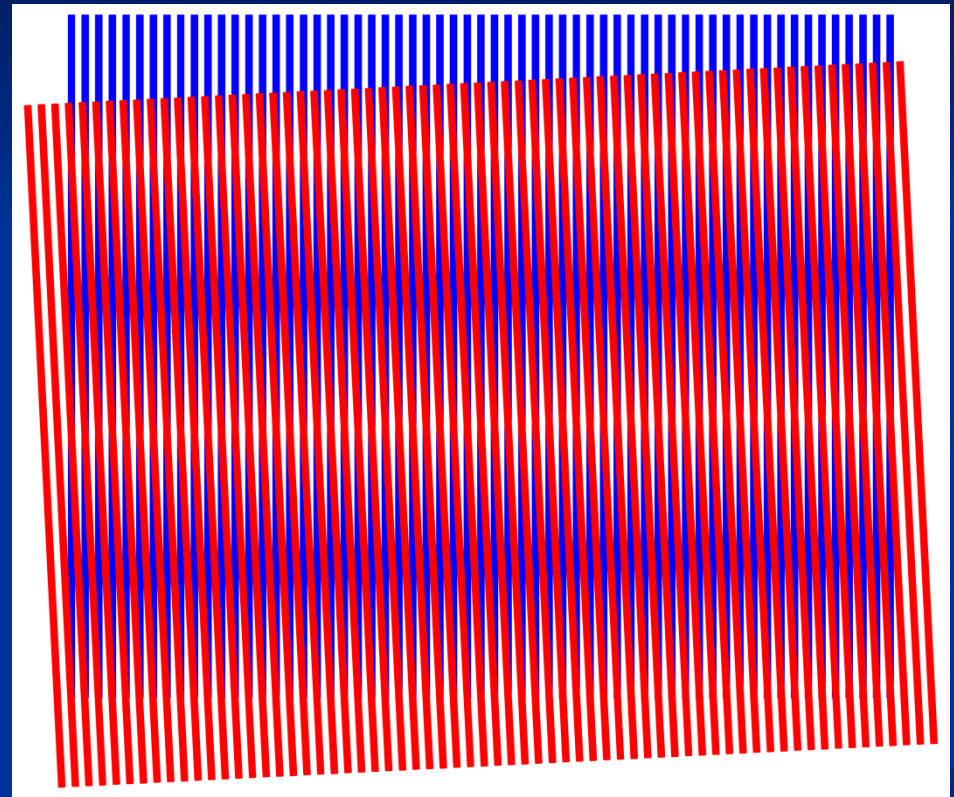
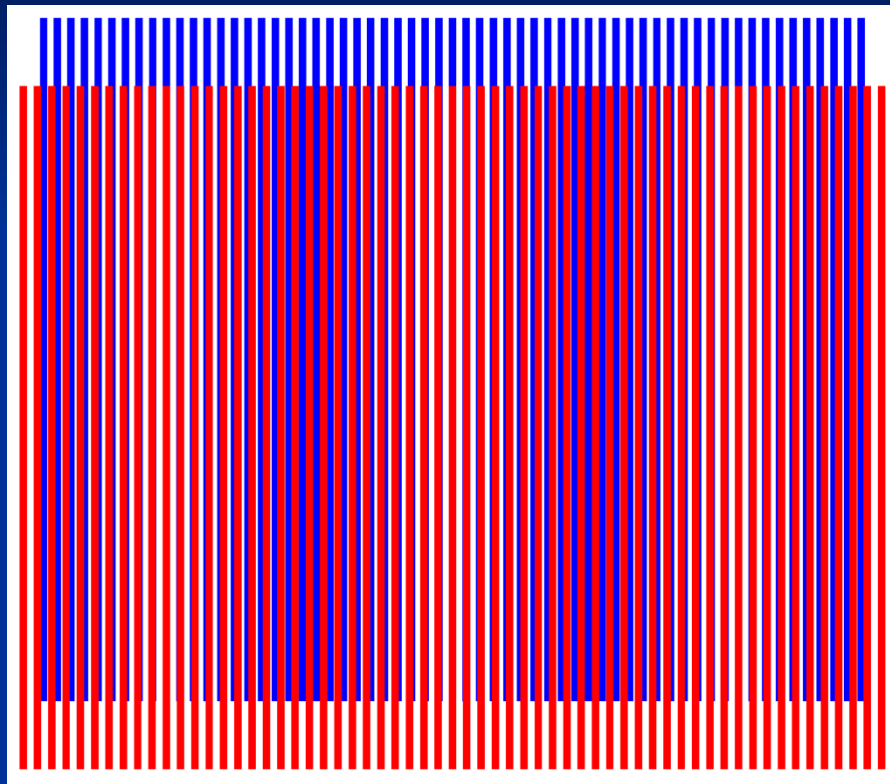


図2.1 代表的なモアレ縞

格子同士の相対変位に対するモアレの移動量の拡大倍率は、格子間隔や傾斜角をパラメータとして任意に設定することが可能である。

【平行格子】

それぞれの格子の間隔を d_1 , $d_2 (>d_1)$ とすると、変位の拡大倍率 X およびモアレ縞の周期 D は次式のとおり。

$$X = d_1 / (d_2 - d_1)$$

$$D = d_1 \cdot d_2 / (d_2 - d_1)$$

⇒ 計測原理はノギスに近似

【傾斜格子】

格子の間隔を d , 二つの格子がなす傾きを θ とすると、変位の拡大倍率 X およびモアレ縞の周期 D は次式のとおり。

$$X = 1 / \{2 \cdot \sin(\theta / 2)\} \doteq 1 / \theta$$

$$D = d / \{2 \cdot \sin(\theta / 2)\} \doteq d / \theta$$

■ システム概要

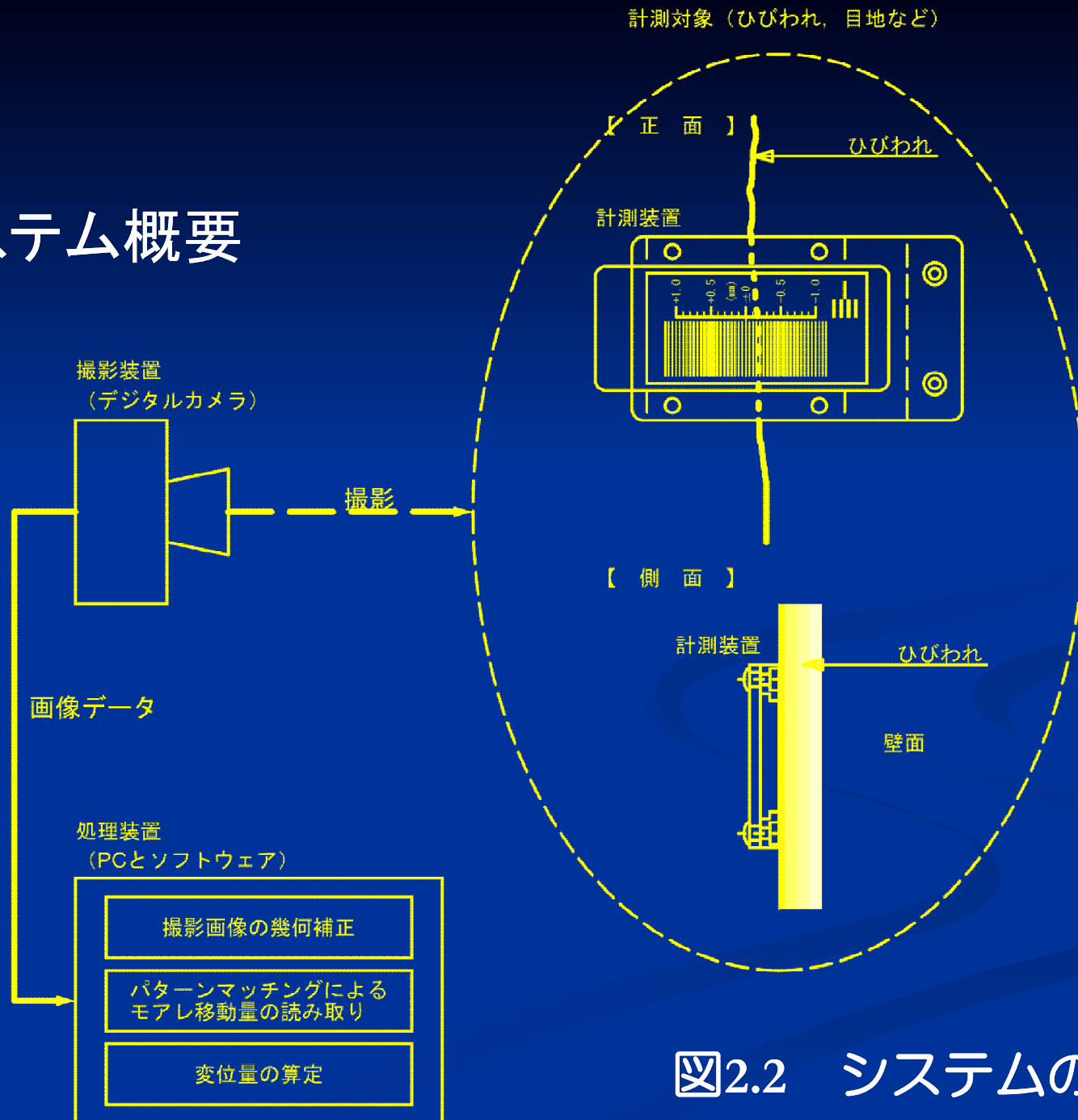
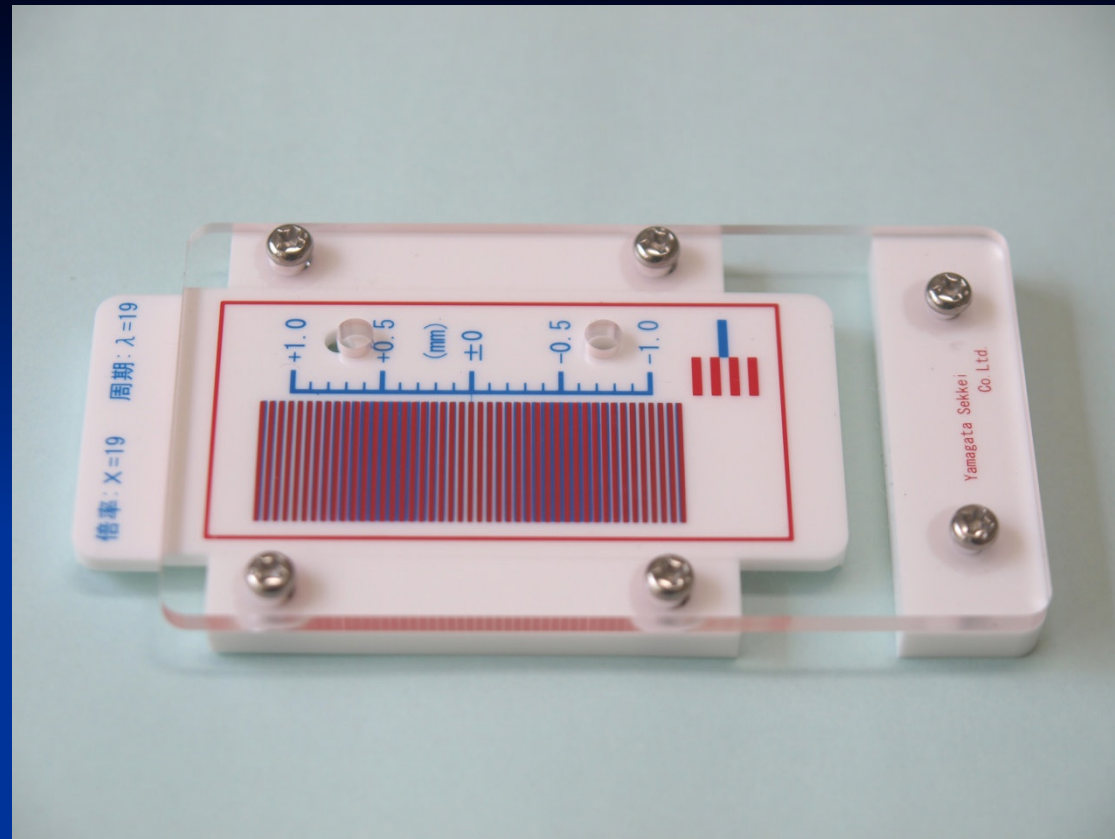


図2.2 システムの概要図



- 【諸 元】
- パターン : 平行格子
 - 格子間隔 : $d_1, d_2 = 0.95, 1.00\text{mm}$
 - 変位の拡大倍率 : $X = 19$
 - モアレの周期 : $D = 19\text{mm}$
 - 測定範囲 : $\pm 3\text{mm}$ または $-1\text{mm} \sim +5\text{mm}$

図2.3 計測装置 (変位計)

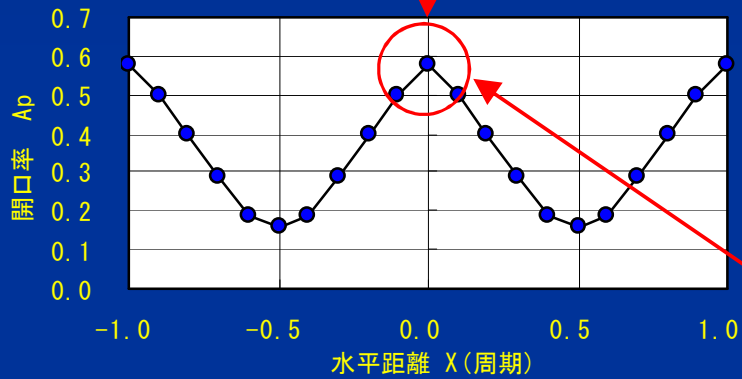
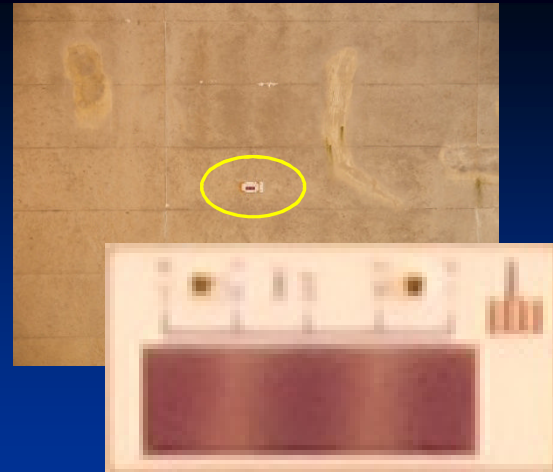
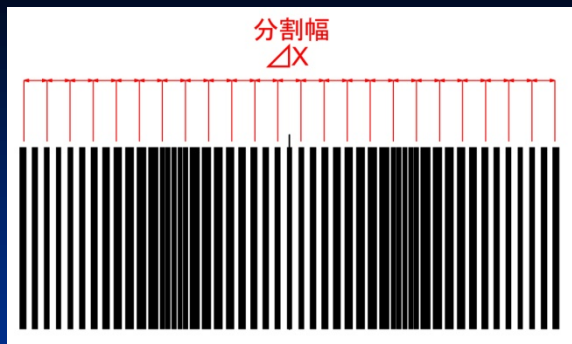
計測装置は2枚の板状の部品からなり、対象のひび割れ等を挟むように設置する。その後の変位増分を格子同士の相対変位を介してモアレの移動量として拡大表示させている。

デジタルカメラなどの撮影装置により計測装置を離れた地点から撮影することで計測を行う。

画像データをPCとソフトウェアからなる処理装置に取り込み画像の歪みなどの補正を行う。

補正した画像データのモアレの明暗パターンと理論パターンとをマッチングさせることでモアレの移動量を読み取り、最終的に変位を算出する。

モアレの明暗パターンの周期性に着目してマッチングすることで、 ± 1 pixel程度の精度での読み取りが可能となる。



マッチング

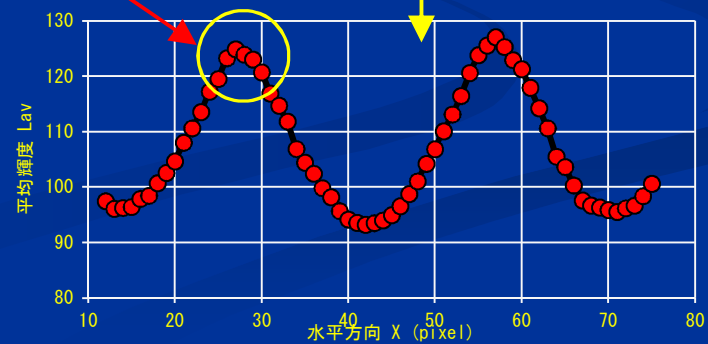
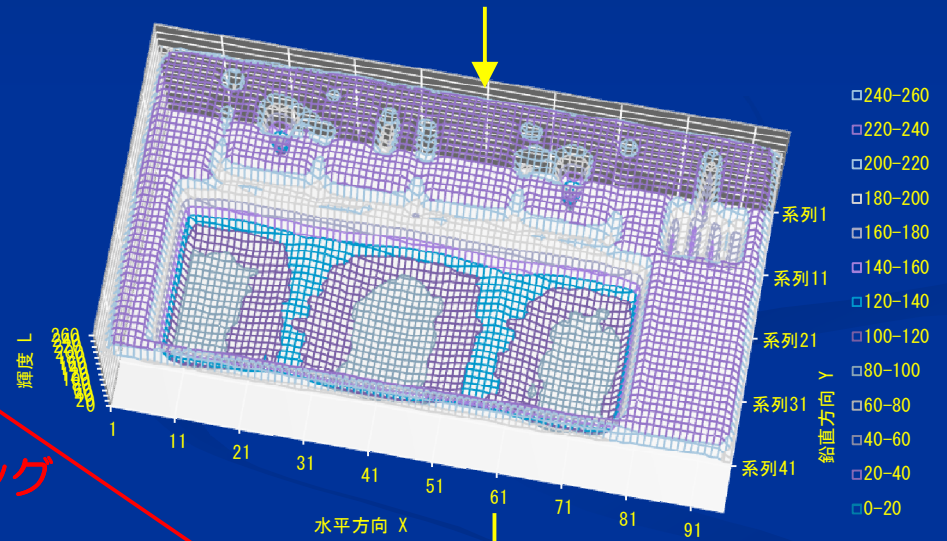


図2.4 モアレパターンの
周期性とマッチング

■ 計測精度

モアレの明暗パターンを認識できる解像度の画像であれば、格子を構成する直線を識別できなくても計測可能であり、これにより画像の1画素よりも小さい変位の計測を原理的に可能としている。

マッチングの誤差を±1 pixelとすると計測精度は計算上解像度の1/Xとなる。実際の精度はこれよりも低くなるが、一般的な条件下であれば解像度の約1/10の精度は確保できると評価している。(この事例では0.05mm程度)

高画素数のカメラや望遠レンズを用いることで、種々の限界はあるが、より遠方からの計測も可能となる。

3. 計測事例

3.1 トンネルでの計測実験

道路トンネルにおいて撮影距離を変化させて読み取り値の比較を行った。計測条件は以下のとおり。

カメラ	:	デジタル一眼レフ
画素数	:	約1000万画素(3648*2736pixel)
レンズ	:	108mm(35mm版換算) / f3.5
感度 / 露出	:	ISO200 / +0.7EV
照明	:	トンネル照明のみ
撮影距離	:	L = 3m , 5m , 7m
画像解像度	:	0.27 , 0.46 , 0.64mm/pixel

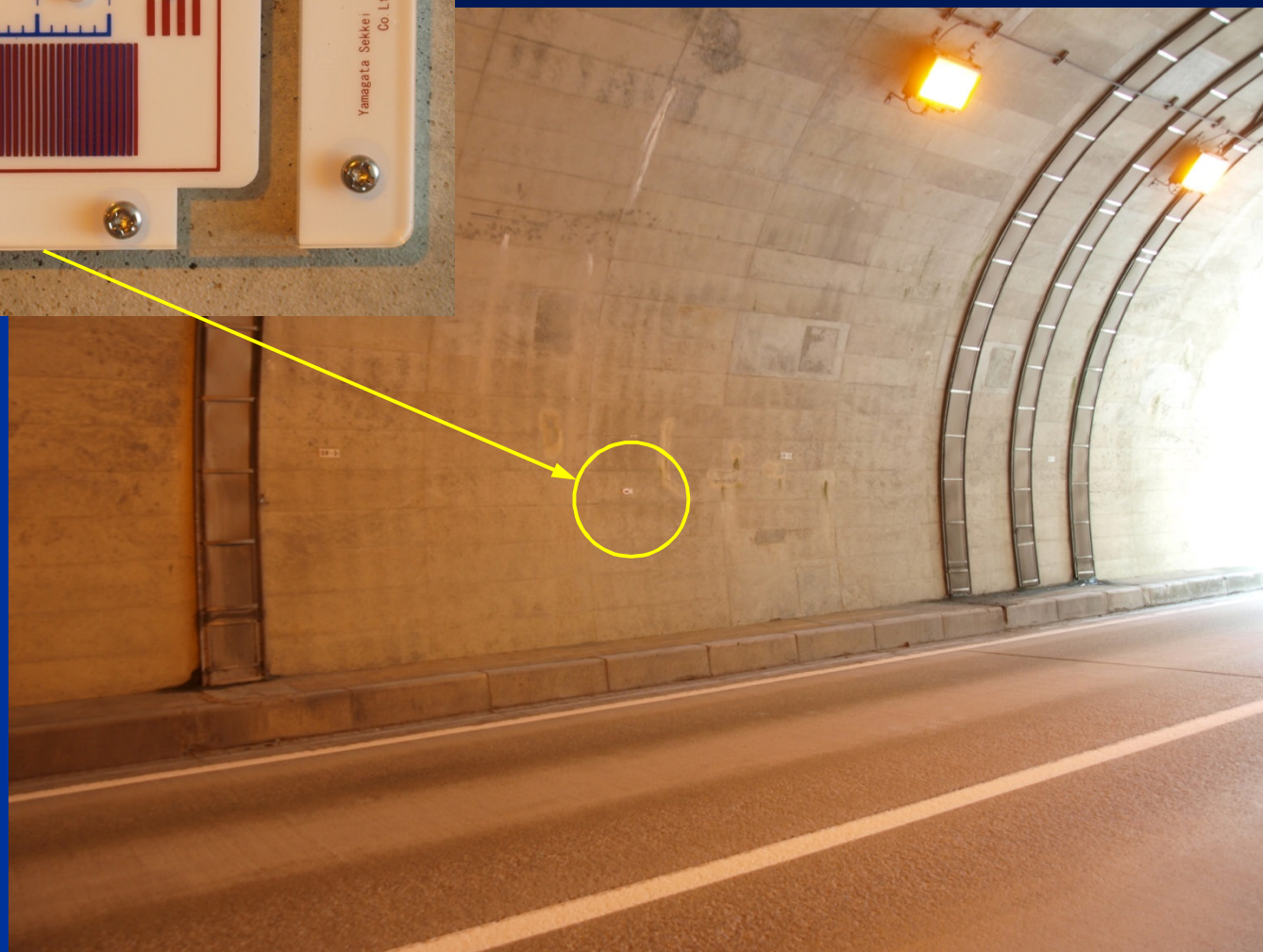
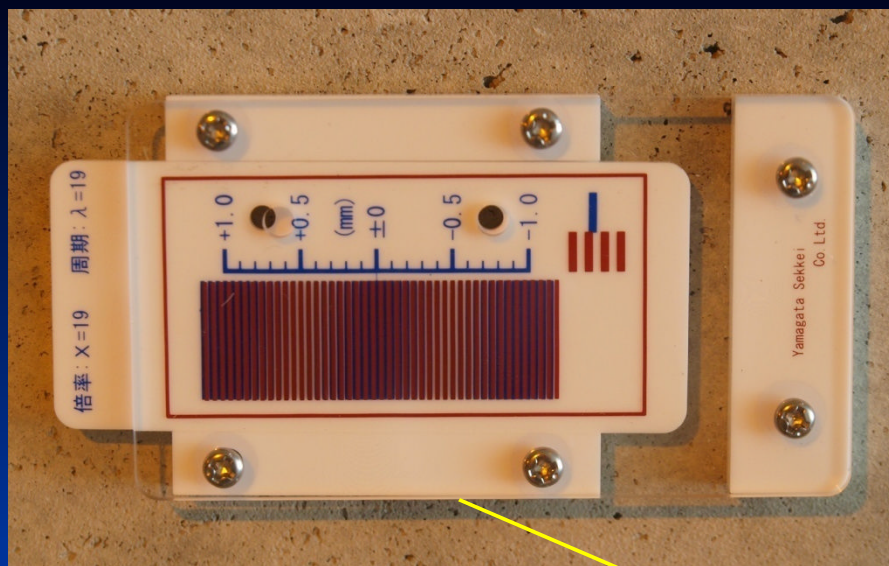


図3.1 計測装置設置状況



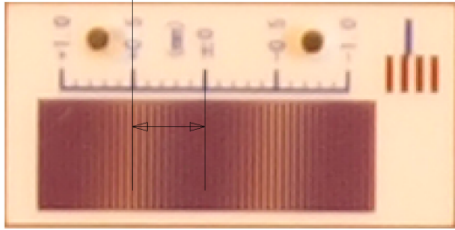
左上：L=3m，0.27mm/pixel

右上：L=5m，0.46mm/pixel

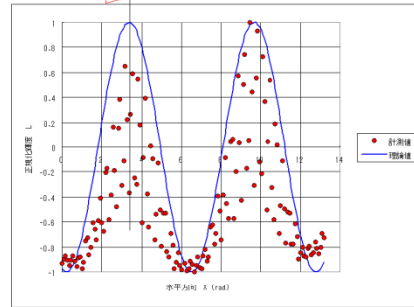
左下：L=7m，0.64mm/pixel

图3.2 摄影画像

【幾何補正画像】

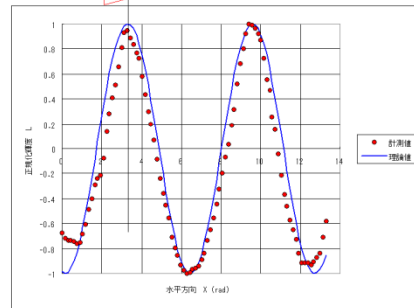
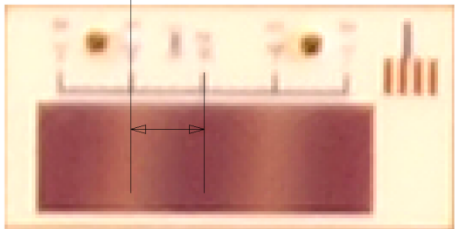


【マッチング解析】



【撮影距離3m】

モアレ移動量 9.633 (mm)
変位量 $\delta = 0.507$ (mm)

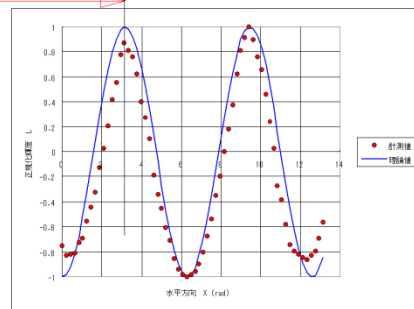
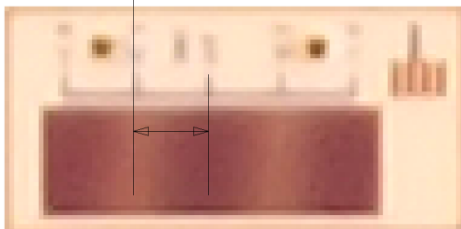


【撮影距離5m】

モアレ移動量 9.925 (mm)
変位量 $\delta = 0.522$ (mm)

撮影距離3mとの読み取り誤差

$$\triangle \delta = 0.015 \text{ (mm)}$$



【撮影距離7m】

モアレ移動量 10.105 (mm)
変位量 $\delta = 0.532$ (mm)

撮影距離3mとの読み取り誤差

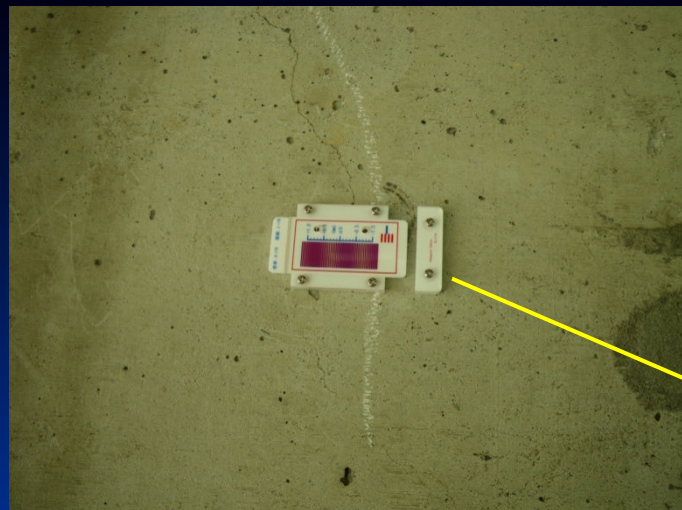
$$\triangle \delta = 0.025 \text{ (mm)}$$

図3.3 読み取り値の比較

3.2 橋梁での計測実験

道路橋下部工（橋脚）においてレンズと撮影距離を変化させて読み取り値の比較を行った。計測条件は以下のとおり。

カメラ	:	デジタル一眼レフ
画素数	:	約1000万画素(3648*2736pixel)
レンズ	:	108mm,151mm,400mm,560mm
感度/露出	:	ISO100/±0,+0.3,+0.7EV
照明	:	なし
撮影距離	:	L = 3,5,7,10,15,20,25,30,35,40m
画像解像度	:	0.17~0.98mm/pixel



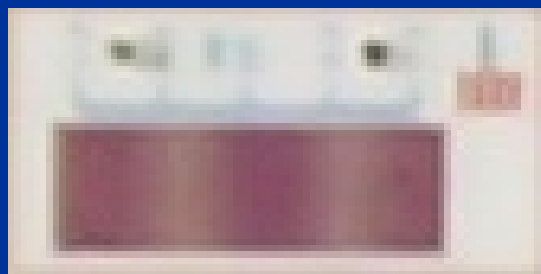
変位計・T2



変位計・T1



図3.4 計測装置設置状況



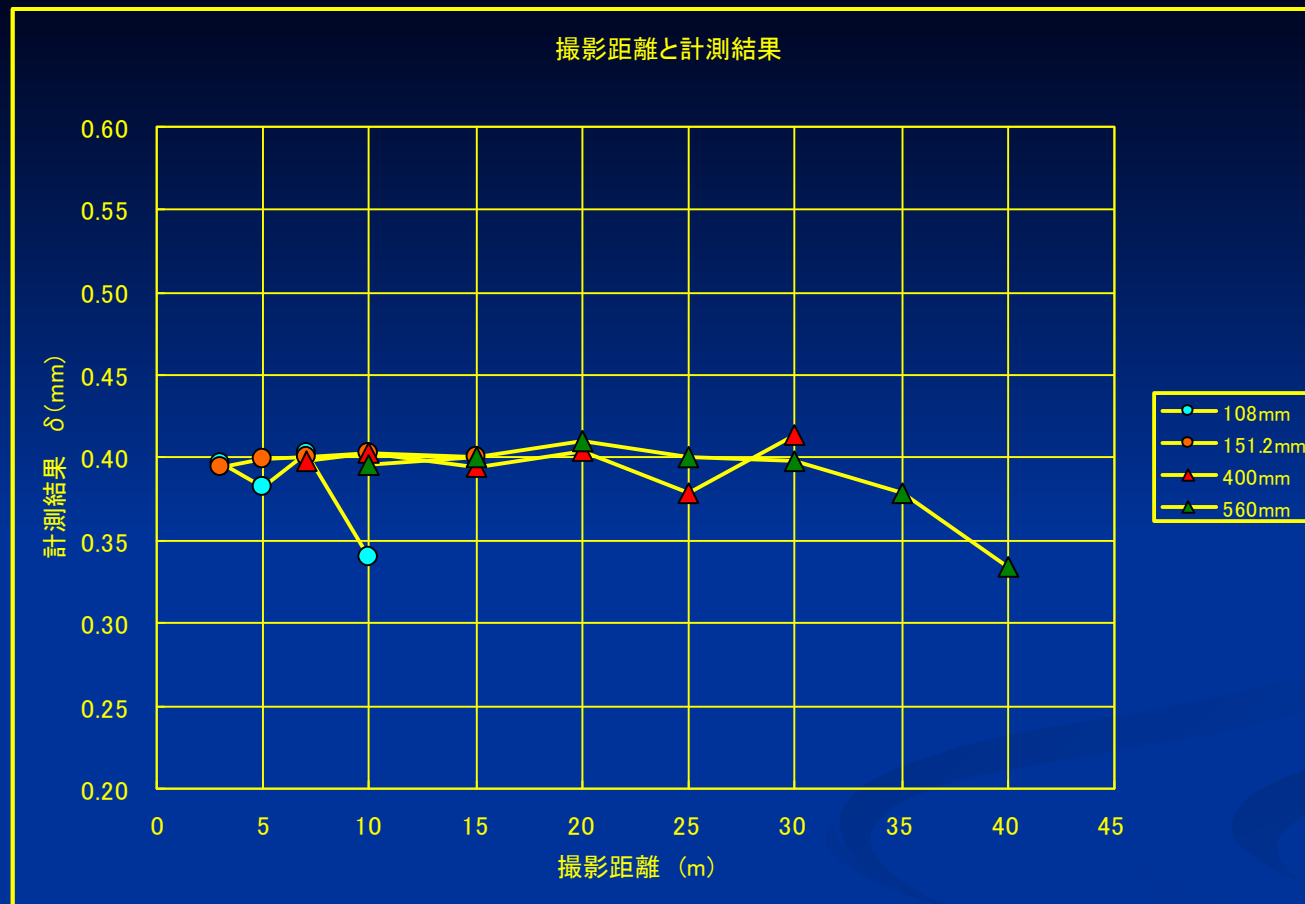
左上：f=400mm，L=30m

右上：撮影画像

0.74mm/pixel

左下：補正画像

図3.5 撮影状況(T1)

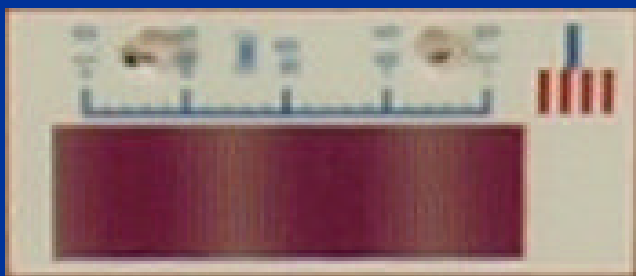


最大／最小値 $\delta_{\max} = 0.414\text{mm}$, $\delta_{\min} = 0.334\text{mm}$

平均値 $\delta_{\text{ave}} = 0.392\text{mm}$

標準偏差 $\sigma = 0.020\text{mm}$

図3.6 読み取り値の比較(T1)



左上：撮影画像

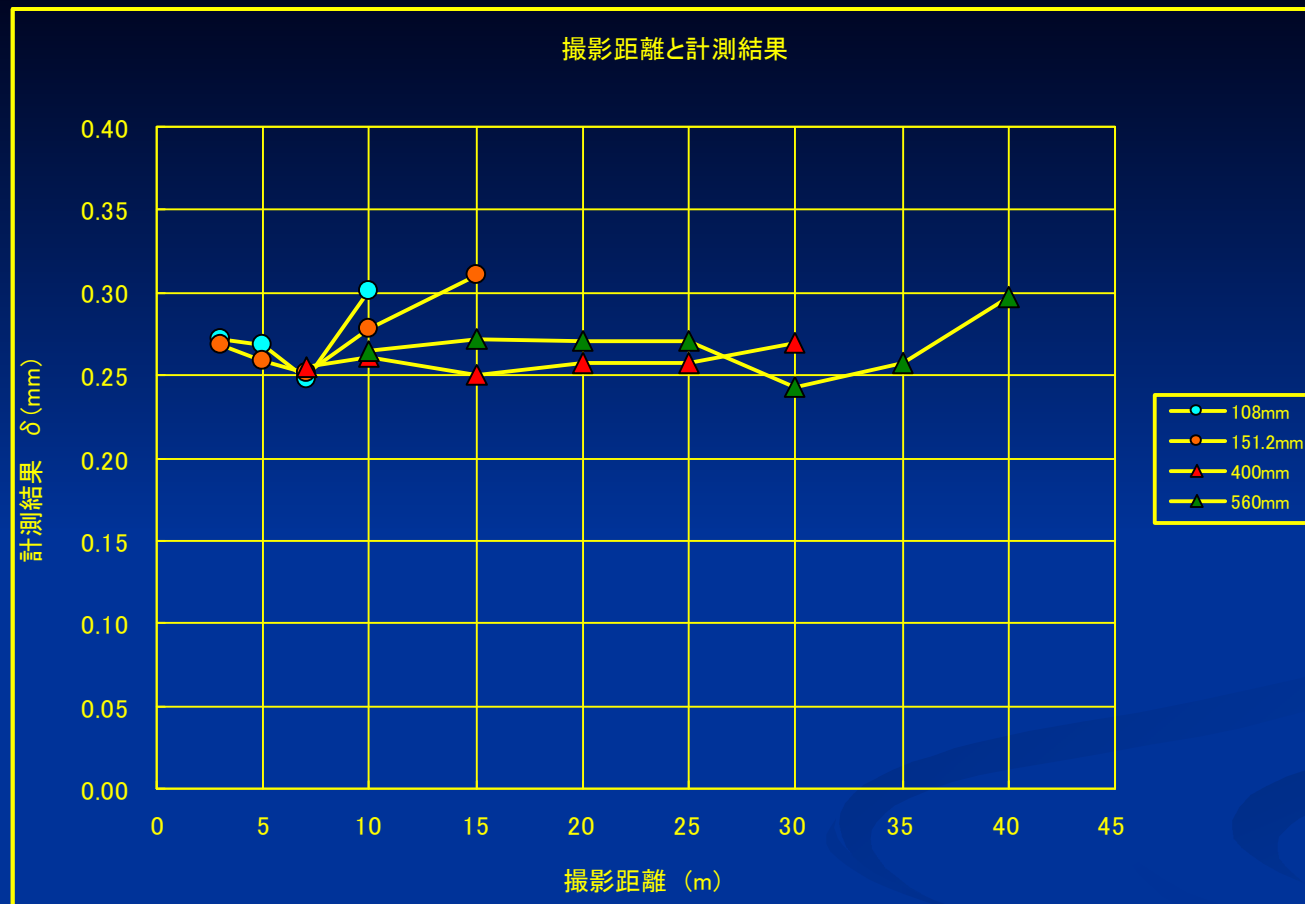
$F=108\text{mm}$, $L=3\text{m}$

0.27mm/pixel

右上：切抜き画像

左下：補正画像

図3.7 撮影状況(T2)



最大／最小値 $\delta_{\max} = 0.311\text{mm}$, $\delta_{\min} = 0.243\text{mm}$

平均値 $\delta_{\text{ave}} = 0.267\text{mm}$

標準偏差 $\sigma = 0.017\text{mm}$

図3.8 読み取り値の比較(T2)

4. おわりに

■ 現段階での評価と今後の課題

簡易な変位計測システムについて、解析手法までを含めて概ね実用レベルに達したものと評価している。

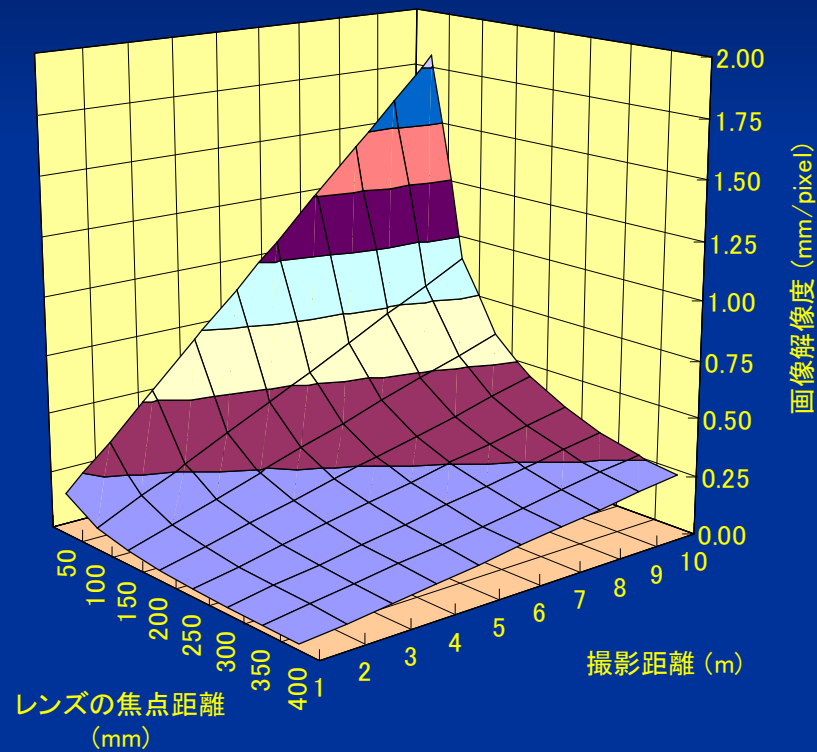
トンネルなど地下空間での利用を想定して開発したシステムであるが、今回の震災などで比較的軽微な損傷を受けた構造物の変位やひび割れのモニタリング手法の一つとしても貢献できるのではないかと期待している。

今後は実際のフィールドに適用してシステムの有用性を実証し、信頼性の向上や適用範囲の拡大などの改良を進めていきたいと考えている。

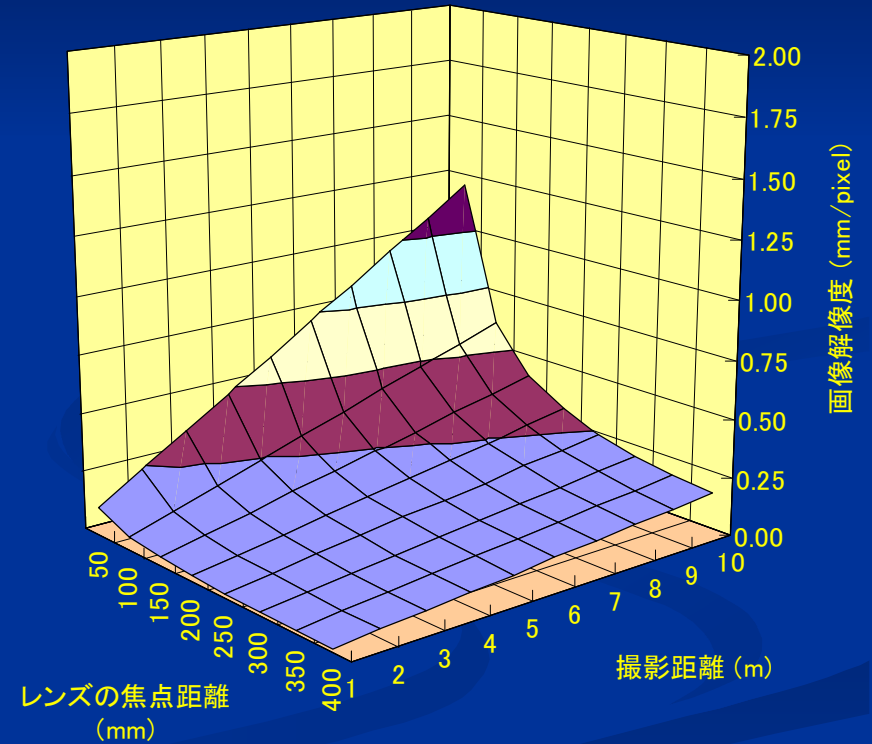
今回の開発にあたっては社団法人東北建設協会より平成23年度建設事業に関する技術開発支援制度に選定いただき、多大なご支援を賜りました。厚くお礼申し上げます。

参考資料-1 撮影条件と解像度

(B*H=4000*3000=1200万画素)



(B*H=6000*4000=2400万画素)

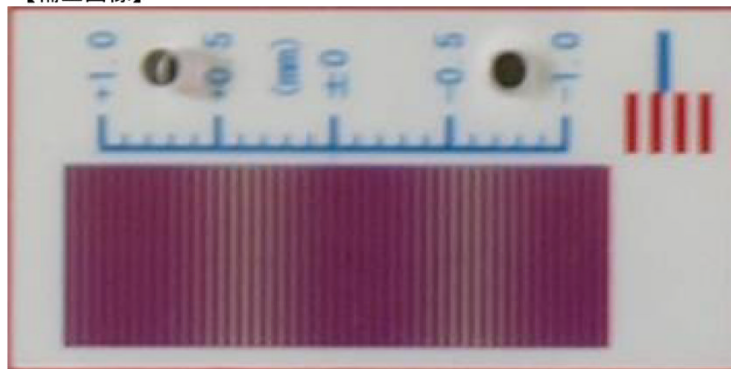


参考資料-2 EXCELによる解析事例

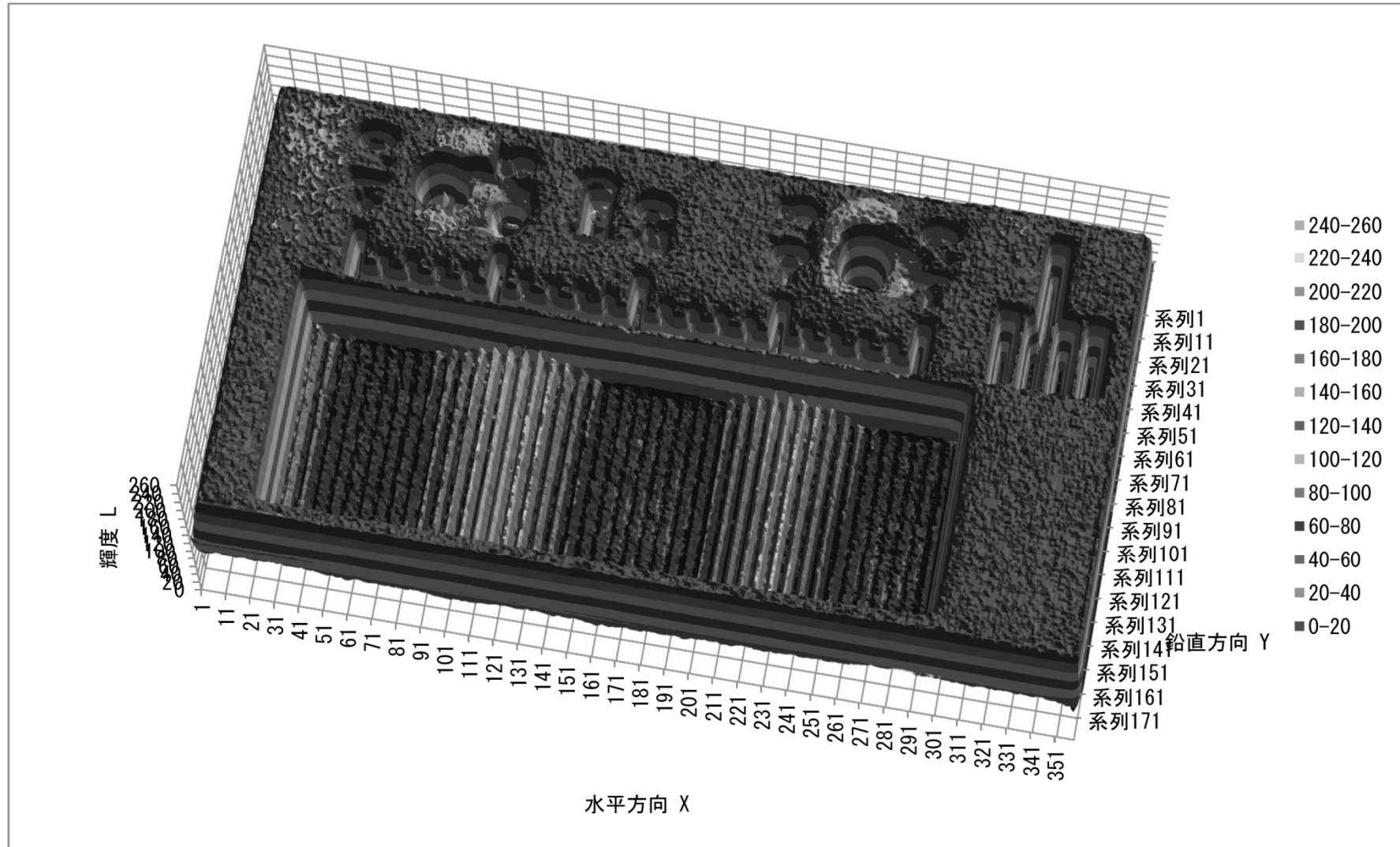
【撮影画像】



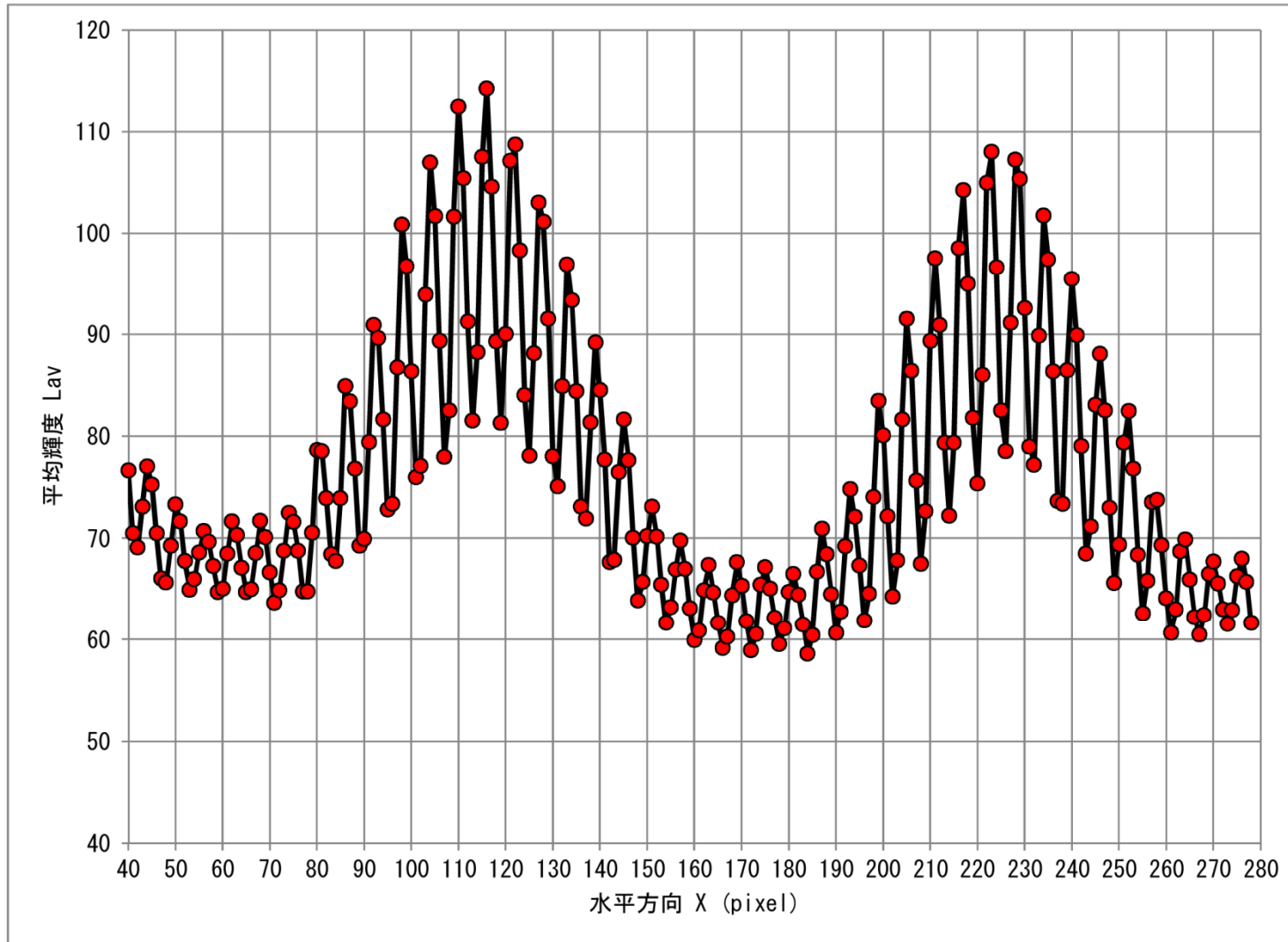
【補正画像】



【輝度等高線表示2】



【輝度最大値解析】

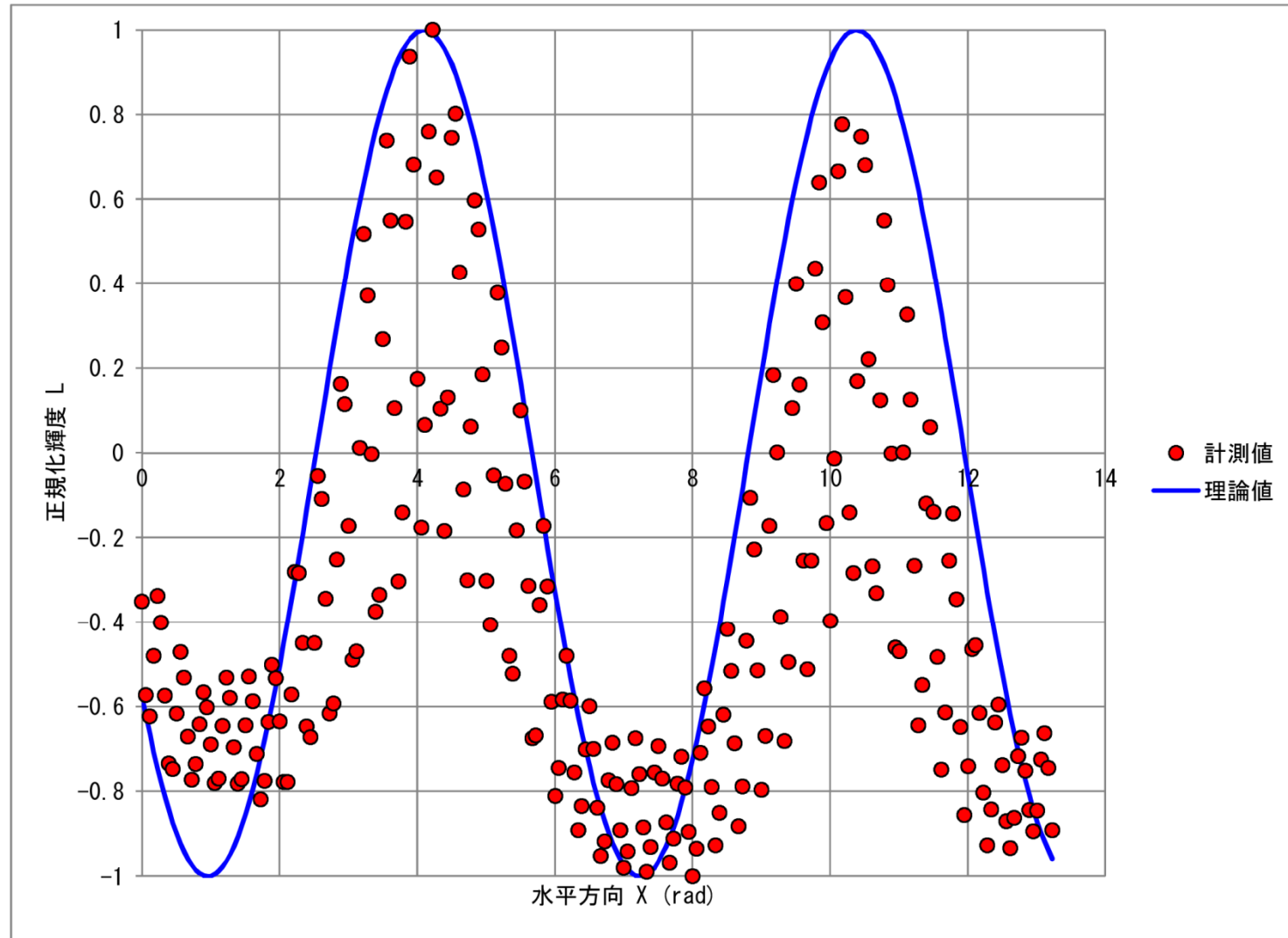


【輝度ピーク位置】

+側ピーク
位置(pixel) 116

-側ピーク
位置(pixel) 223

【パターンマッチング解析】



【輝度ピーク位置】

+側ピーク
位置(pixel) 114

-側ピーク
位置(pixel) 227

ご清聴，有難うございました。

山形設計（株）

<http://www.ysc-aqua.co.jp/>