

## 地盤工学における模型実験

### 第4回 模型実験における測定技術

#### Measurement techniques in model tests

西岡 英俊 (にしおか ひでとし)

中央大学 理工学部都市環境学科 教授

e-mail: nishioka@civil.chuio-u.ac.jp

上野 勝利 (うえの かつとし)

徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 准教授

キーワード: 計測, 測定,

### 1. 何をどう測るか

良い模型実験を実施するためには、どのような模型でどのような現象を再現するかという問題と同程度に、「何をどう測るか」という問題が重要となる。まず、この「測る」という行為に関連する「測定」、「計測」、「観測」、「観察」という用語について、改めて整理しておく。表-1 にこれらの用語の定義の例および出典をまとめて示す。

「測定」と「計測」の英訳にはどちらも「measurement」が当てられることが一般的であるが、JIS Z 8103:2019

「計測用語」ではこれらは明確に区別されており、「測定」の方が「計測」よりも狭い定義となっている。また、「観察」と「観測」は英語ではどちらも「observation」が一般的であり、自然科学分野ではこれらを「自然状態のままに物事や現象を捉えること」と解釈して実験とは別の研究手法と扱う場合がある。しかしながら、模型実験は自然状態で起こり得ることの再現を試みるものでもあり、「模型実験の観察」や「模型実験の観測」

表-1 「測る」行為に関連する用語の定義の例

用語	定義	出典
測定	ある量をそれと同じ種類の量の測定単位と比較して、その量の値を実験的に得るプロセス。	JIS Z 8103:2019 「計測用語」
計測	特定の目的をもって、測定の方法及び手段を考究し、実施し、その結果を用いて所期の目的を達成させること。	
観察	物事の状態や変化を客観的に注意深く見ること。	デジタル大辞泉 <sup>1)</sup>
観測	自然現象を精密に観察・測定し、その変化や推移を調べること。	

という行為が存在しうる。

これらの用語の定義を踏まえて、改めて模型実験における「測る」という行為を考えると、「測定に基づく計測を主体としつつ、必要に応じて観測・観察を適切に組み合わせた行為」と解釈できよう。しかしながら、第4回では誌面の都合もあり、その中でも最も基本となる「測定」のみを取り扱うこととする。具体的には地盤工学分野における模型実験で一般的と思われる測定技術に限定して、模型実験を実施する上で最低限知っておきたい知識を紹介する。各測定技術の原理などの記載は割愛する（または最小限に留める）が、道具を使いこなすためにはこれらも有用な情報であり、実際に使用する技術については各自学習されたい。

模型実験における「計測」・「観測」・「観察」を含めた「測る」という行為全般の具体的な考え方や、X線CTによる密度測定など第4回では扱えなかった高度な測定技術の模型実験への適用事例については第5回以降の各論を参照されたい。また、良い模型実験を実施するためには、「何を」測るかの計画も重要となる。力学的な模型実験では、「荷重・応力を測ること」と、「変位・ひずみを測ること」のバランスが重要となるが、これらの具体的な考え方や事例についても第5回以降の各論を参考とされたい。

### 2. データ収録システム

測定技術の根幹として、ロードセルや変位計、ひずみゲージなどの各種センサ<sup>2)</sup>で得られたデータを正しく記録（収録）するシステムが必要である。かつて

はダイヤルゲージなどの測定器の表示値を人が直接目で読み取って野帳等に記録するという人力の収録システムが主流であった。現在では電気信号を用いたデータ収録システムが広く普及しているが、検証・キャリブレーションの目的で旧来の人力の収録システムを併用することもある。

電気信号によるデータ収録（サンプリング）の方法としては、各センサからの電気信号の経路（チャンネル）毎にアナログ信号（電圧値等）が入力され、これをPCで利用可能なデジタルデータにA/D変換し、更に必要に応じて各センサ固有の係数（校正係数）を乗じて物理量に変換した上で、最終的にCSVファイル等の形でデジタルデータとして記録・出力する方式が一般的である。単独でデータ収録可能なシステムが、静ひずみ測定器、動ひずみ測定器、データロガー<sup>注2)</sup>等といった名称で市販されているほか、PCにA/D変換ボードを接続して直接測定することもできる。

## 2.1 ひずみ測定システム

地盤工学分野に限らず、模型実験ではひずみゲージを用いたひずみ測定、あるいはひずみゲージ式のセンサを用いた測定がよく用いられる。これらはひずみゲージの伸縮に伴う電気抵抗の微小な変化を、ホイートストンブリッジ回路（ブリッジ回路と略されることが多い）を介して電圧変化として、ひずみに応じたセンサ出力を測定する（図-1）。市販されているデータ収録システムの多くは、ひずみゲージによるひずみ測定を行うためのブリッジ回路とそれに一定の入力電圧を与える機構が用意（内蔵または外付け）されており、それを用いればひずみ値を直接測定することができる。

なお、本来、ひずみ自体は無次元量だが、多くのひずみ測定システムでは $10^{-6}$ 単位でひずみ値を記録しており、計測結果は、例えば $1250 \times 10^{-6}$ のひずみ値を $1250 \mu\epsilon$ や $1250 \mu\text{ST}$ （読み方は1250マイクロひずみ、マイクロストレインなど）と表示される。ひずみゲージ式センサでは、あらかじめ求められたセンサ毎の校正係数（ $1 \mu\epsilon$ に対する物理量の比率）をひずみ値に乗じて物理量に変換する。

ひずみゲージでの測定では、測定対象材料の表裏に2枚のゲージを貼り、これらをブリッジ回路に適切に結

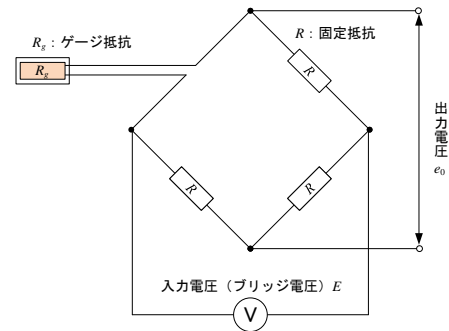


図-1 ホイートストンブリッジ回路（1ゲージ法）

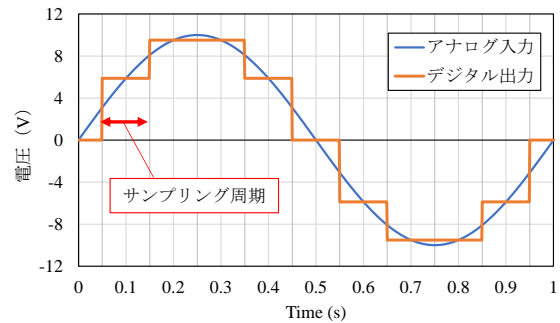


図-2 サンプリング周期/現象周期=1/10のA/D変換の例

線することで、曲げ成分を除去した軸方向（引張または圧縮）成分のみ、あるいは軸方向成分を除去した曲げ成分のみのひずみ値を測定することもできる（2ゲージ法）。ひずみゲージ式センサは更に温度補償用ゲージ2枚を直交配置した4ゲージ法が一般的である。これらのひずみゲージによる測定原理の詳細やブリッジ回路の具体的な説明は、各メーカーの技術資料等に詳しいのでここでは割愛する。

## 2.2 サンプリング周期とサンプリング方式

時間的に変化するアナログ信号をデジタル変換して収録する時間間隔をサンプリング周期といい（図-2）、その逆数のサンプリング周波数で表す場合もある。動的な模型実験では、一般にはサンプリング周期は図-2に示すように測定対象とする現象の周期の1/10以下とする必要があるとされており、加振周期のほか対象とする模型の固有周期などに応じて適切に設定する必要がある。一方、静的な模型実験でのサンプリング周期は、数秒から長ければ数時間を超える設定とすることがあり、インターバルと呼ぶこともある。また、一定時間間隔でデータ収録を行うのではなく、手動で収録タイミングを指定する場合やある条件に達した場合に収録を行うトリガ測定とする場合もある。

1 サンプルング方式には、大きく「同時サンプルング  
2 方式」と「スキヤニング方式(多点切替方式)」がある。  
3 これらは、複数チャンネルの測定を行う際の各チャン  
4 ネルのA/D変換のタイミングの違いであり、前者は全  
5 チャンネルを同時にサンプルングするのに対して、後  
6 者は収録するチャンネルを順に変えていく(スキヤン  
7 していく)方式である。当然ながら、スキヤニング方  
8 式では、1チャンネルの収録に要する時間(スキヤニン  
9 グ速度)が遅いほど、また測定チャンネル数が多くな  
10 るほど、実際に測定される時刻の差が大きくなる。

11 サンプルング周期(およびスキヤニング速度)とサ  
12 ンプルング方式は、ノイズへの抵抗性や長期間の安定  
13 性、収録データサイズなどとトレードオフの関係にあ  
14 り、一概にサンプルング周期やスキヤニング速度が短  
15 い同時サンプルング方式が優れている訳ではない。例  
16 えば、サンプルング周期を過度に短くすると収録され  
17 るデータ量が非常に大きくなるほか、測定の絶対値が  
18 ずれてしまう誤差(「ドリフト」ということがある)を  
19 生じる場合もある。そのため、圧密現象のような長期  
20 間の測定を必要とする静的な模型実験では、スキヤニ  
21 ング方式の収録システムで長めのサンプルング間隔を  
22 設定する方が、信頼性の高い測定が可能になる。

## 2.3 測定可能範囲, 分解能, 感度

23 データ収録システムおよび使用する各センサの組合  
24 せに応じて、測定可能範囲<sup>注3)</sup>と分解能<sup>注4)</sup>や感度<sup>注5)</sup>が  
25 決定される。模型実験を計画する段階で、実際に測定  
26 しようとする現象の特性に応じて、必要な測定可能範  
27 囲, 分解能, 感度の条件を明らかとし、データ収録シ  
28 ステムと使用する各センサを適切に選定・設定するこ  
29 とが重要となる。

30 また、実際の測定時にデータ収録システムあるいは  
31 センサの測定可能範囲を超えた場合<sup>注6)</sup>に、データ収録  
32 システム上でどのようなデータが記録されるかについ  
33 ても、あらかじめ把握しておく必要がある。電圧値が  
34 ある一定値にジャンプするなど、測定可能範囲を超過  
35 したことが明確な場合には比較的問題は少ないが、単  
36 に測定可能範囲の上限に相当する一定値が記録として  
37 残ってしまう場合は、その結果を正しい値と誤解しな  
38 いよう注意する必要がある。



a) 圧縮型

b) 引張・圧縮型

図-3 ひずみゲージ式ロードセルの例(東京測器研究所製)

## 3. 荷重

基礎の支持力実験などのような静的な载荷実験では、  
基礎に作用する全荷重を正しく測定する必要がある。  
荷重を測定するセンサは、ロードセルや荷重計などと  
呼ばれ、地盤工学分野では負荷に伴って内部の起歪部  
に生じる僅かな変形をひずみゲージで計測することで  
荷重を検知するひずみゲージ式ロードセルが多く用い  
られている(図-3)。

なお、ロードセルは、あらかじめ定められた軸に沿  
った力のみ感知するように設計されており、荷重の偏  
心や傾斜、モーメントが作用すると誤差を生じる場合  
がある。そのため、圧縮側では球座やスライド機構を  
有する治具でモーメントや横荷重を除去し、引張側で  
はロッドエンド等で回転および曲げのモーメントを除  
去するなど、適切な取付方法とすることが重要となる。

このような横方向荷重やモーメントが除去しきれな  
い場合(あるいは意図的にこれらの組合せ荷重を作用  
させたい場合)には、直交方向のせん断力も同時に測  
定できる3分力計や、3方向の力のほかに各軸回りの  
モーメントも加えた計6成分を直接計測できる6分力  
計を用いる方法も考えられる。

## 4. 土圧, 地盤反力, 間隙水圧

地盤工学分野での模型実験では、土圧あるいは地盤  
反力も重要な測定項目である。図-4に示すような各  
種の土圧計が市販されているが、それらは大きくは模  
型地盤中に埋設して土中土圧を測るタイプと、擁壁等  
の部材の表面に設置して部材表面に作用する壁面土圧  
や地盤反力を測るタイプに分けられる。

これらの土圧計を用いる場合には、受圧面がどこに  
あり、地盤の挙動にどのように反応するのかを事前に



a) 土中土圧測定用      b) 壁面土圧測定用

図-4 土圧計の例 (共和電業製)

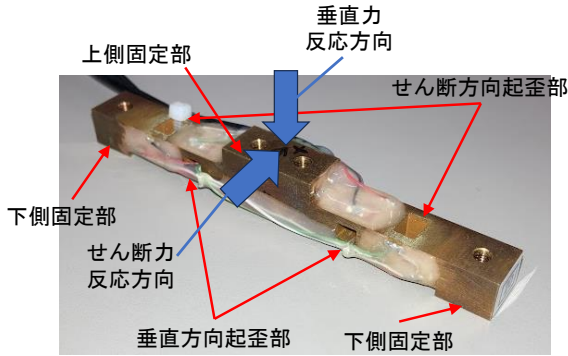


図-5 2方向ロードセルの例

確認しておくことが重要である。特に、土圧計の寸法や配置位置によっては、受圧面周辺に応力集中が生じることで過大な土圧が測定される場合（あるいはその逆）もある。特に部材表面に土圧計を設置する場合には、この応力集中の影響を避けるため、土圧計の受圧面が周囲の部材表面と平滑となるように埋め込むのがよい<sup>3)</sup>。また、土圧分布が様でない場合に土圧計を離散的に配置した場合には、その結果の解釈（土圧分布形状の推定）には十分注意する必要がある。なお、土圧分布形状を詳細に測定する必要がある場合については、シート型の圧力センサを用いた土圧の計測が有効となる場合もある<sup>4)</sup>。

なお、一般的な土圧計は、受圧面に対して垂直な方向の荷重のみを計測するが、実際には受圧面に対して垂直な方向の力（以下、垂直力）だけでなく、平行な方向の力（以下、せん断力）も作用している。このせん断力も測定するために地盤工学分野でしばしば用いられるのが、2方向ロードセルである（図-5）。2方向ロードセルは、門型構造のロードセルに垂直力のみに対応する起歪部とせん断力にのみ反応する起歪部を別々に配置することで両者を同時に測定するものであり、地盤工学分野では帯基礎底面の摩擦角測定のために開発・適用され<sup>5)6)</sup>、その後、擁壁土圧実験など各種の模型実験で広く使用されている。2方向ロードセル

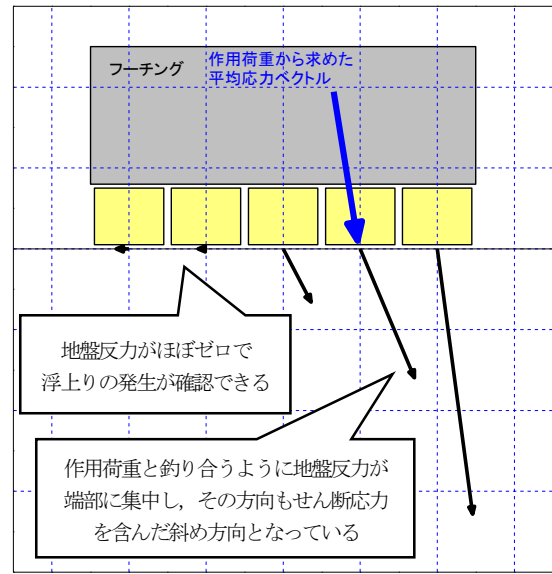
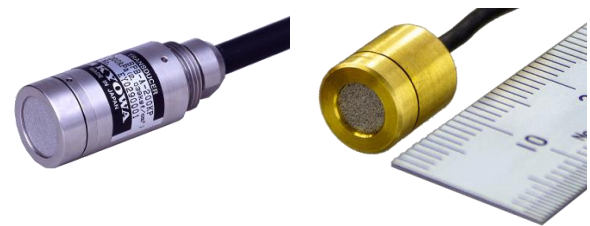


図-6 偏心傾斜荷重を受ける直接基礎底面の地盤反力の2方向ロードセルを用いた測定事例<sup>7)</sup>



a) 共和電業製      b) 東京測器研究所製

図-7 間隙水圧計の例

を用いた模型での測定例<sup>7)</sup>を図-6に示す。この事例では、複数の2方向ロードセルの受圧板を僅かな隙間で隣接させることで、基礎や擁壁のある一定範囲に作用する土圧分布を測定でき、同時にその合計値が全土圧合力と一致するかどうかを確認することができる。

このほか、地盤工学分野の模型実験においては、土中の間隙水圧の測定が必要となることも多い。この場合、受圧面をフィルタで防護して土粒子からの接触力を受けずに間隙水の圧力のみに対応する間隙水圧計が用いられる（図-7）。なお、このフィルタと受圧面の間に気泡が入ると間隙水圧を正確に把握することが困難となるため、フィルタ部を確実に飽和させておく必要がある。当然ながら、間隙水圧計は、地表面よりも上方にある水の水圧を計測することで水位計としても流用できる。

## 5. 部材のひずみ・断面力の深度分布

杭や土留め用の矢板などの部材を用いる模型実験では、多数のひずみゲージを貼付して、ひずみおよびそれに対応する断面力の深度方向分布を求める場合がある。特に杭や矢板の曲げ挙動が支配的となる模型実験では、平面保持仮定の梁理論が成立すると仮定すれば、曲げひずみから曲率を求め、それを深さ方向に積分することでたわみ角(部材の回転角)、さらにはたわみ(部材直交方向の変位)の分布を算出することができる。また、曲げひずみを曲げモーメントに変換<sup>注7)</sup>した上で、この曲げモーメント分布を深さ方向に微分することでせん断力、さらには地盤反力を算出することができる。

地上の突出部などの地盤反力が作用しない部位(あるいは地表面付近の地盤反力が比較的小さい部位)については、曲げモーメントが直線分布となる(すなわちせん断力が一定)と仮定する。一方、地中部では地盤反力が作用するため、微分あるいは積分が容易に行えるようにひずみ分布あるいは曲げモーメント分布を一旦何らかの関数で近似することが多い。

この近似関数としては、最も単純な方法としては多項式での近似が考えられるが、一つの多項式で全深度に渡って十分な精度を確保するのは難しく、区間別に近似関数を使い分けるといった工夫が必要となる。その工夫の例として、菊池は全計測点(節点)で1次および2次の導関数が連続するという特徴を持つ3次スプライン関数<sup>注8)</sup>を用いることで、全深度に渡って比較的精度よく近似できることを確認している(図-8)<sup>8)</sup>。

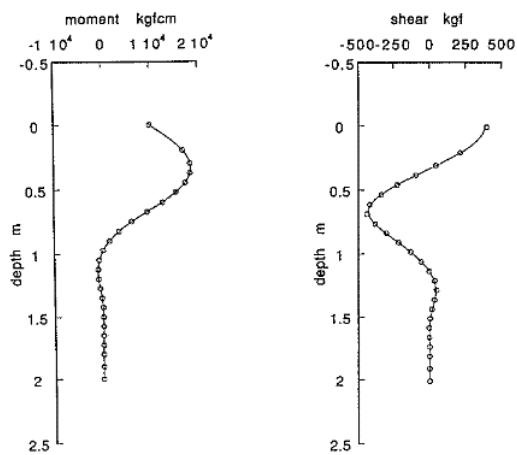


図-8 3次スプライン関数による矢板断面力の近似の例<sup>8)</sup>

## 6. 加速度

振動実験における基本的な物理量の一つである加速度は、一般に加速度計を用いて直接的に測定することが可能である。ここでは、加速度の直接的な測定技術について解説する。

地盤工学分野における模型実験では、ひずみゲージ式加速度計を用いる事例が多いようであるが、圧電型加速度計も用いられる(図-9)。近年では半導体を用いた小型で安価なMEMS加速度計も開発されている。

これらの加速度計の種類の違いは、主に加速度計自体の大きさや容量、精度、価格、使用するアンプ(コンディショナ)の違いのほか、特に応答周波数範囲に大きな違いがある。一般的にひずみゲージ式加速度計は、応答周波数範囲の下限値が0Hz(一般に直流成分を意味するのでDCと表記される)であり、重力加速度のような一定加速度も測定できる<sup>注9)</sup>。一方、圧電型加速度計は、小型で応答周波数範囲の上限が高く、衝撃的な現象も測定可能であるが、直流成分は測定できない。これらの特徴を踏まえ、模型実験の目的に応じて適切な加速度計を選定することが重要である。

振動実験のような動的な模型実験で加速度測定を行う場合は、加速度計自体(および接続コード)が測定対象物と一体に運動するよう、確実に設置することが重要である。特に地盤の加速度を測定する場合には、加速度計へのすべり止めを設置することや、発泡スチロール等で加速度計を包んで比重が周辺地盤と一致するように調整するといった配慮が必要となる。



寸法: 18×18×23mm

質量: 約23g

容量: 10 m/s<sup>2</sup>

応答周波数範囲: DC~30 Hz

a) ひずみゲージ式(東京測器研究所製)



寸法: φ7.8×15.7×Hex7 mm

質量: 約2g

使用加速度: ±2200m/s<sup>2</sup>

周波数範囲(±1 dB): 3~12 kHz

b) 圧電型(共和電業製)

図-9 加速度計の例

## 7. 変位, 傾斜角

### 7.1 変位計による測定

基礎や土留め壁等の変位を高精度に測定するには、変位計を用いるのが基本となる。変位計には、主に接触式変位計（ロッド式やワイヤ式など）と非接触式変位計（レーザ変位計）があり（図-10）、多種多様なものが市販されており、応答周波数範囲にも違いがある。

実験計画時の留意点として、接触式の場合はロッドの押し込み力（あるいはワイヤの張力）や摺動抵抗の影響を考慮する必要がある。また、遠心場での振動実験のように振動数が高い振動実験では、接触式でも測定原理上ロッドの押し込み力が生じない差動トランス式<sup>註10</sup>や非接触のレーザ変位計など、動的応答特性に優れたものを用いる必要がある。なお、レーザ変位計は、内部での演算処理を伴うため、データ収録システムまでの伝送に僅かながら時間遅れが生じる場合があり、必要に応じてその影響を別途補正する。



a) ロッド式変位計（共和電業製）



b) ワイヤ式変位計（東京測器研究所製）



c) レーザ変位計（キーエンス製）

図-10 変位計の例

地表面の変位を測定する場合は、接触式ではロッドの当て板あるいはワイヤのアンカー板を設置する必要がある。レーザ変位計でも受光板を設置することで測定精度が向上する場合もある。地中の地盤変位を測定する場合には、地中内に受圧板を埋設し、そこから鞘管で防護されたロッド（またはワイヤ）を地上に取り出して変位計に接続するといった工夫が必要となる。

また、変位計での測定に共通する重要な留意点として、変位計を取り付ける基準梁を用意する必要があり、特に振動実験においては基準梁自体の振動を極力小さくすることが重要となる。

### 7.2 加速度計の2階積分による変位の測定

主に変位計の設置が困難な地中部の変位測定技術として、振動実験での加速度計の出力を2階積分して間接的に変位に変換する手法がある。ただし、通常は加速度の出力結果を単純に積分しただけでは、積分誤差によって一方向へ変位が累積するため、通常は加速度波形の段階で適切なフィルタ処理を行う必要がある（図-11）。

一般に、加振による残留変位の発生が無視できる場合は、主に低振動成分をカットすることで積分誤差の影響を低減できるが、振幅自体にも誤差が生じる。より高い精度が必要な場合には、事前に地上部でレーザ変位計等による変位計測も行いながら同様の加振を行い、変位量が一致する最適なフィルタ処理のパラメータを決定するなどの工夫が必要となる。ただし、最適なパラメータは加振条件によっても変化し、必ずしもある特定の正弦波加振時で検証されたパラメータが他の加振条件（特に不規則波加振時）にも適用できるとは限らないことに注意を要する。

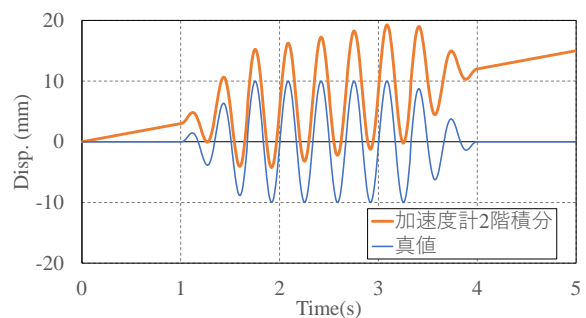


図-11 加速度計2階積分での積分誤差のイメージ

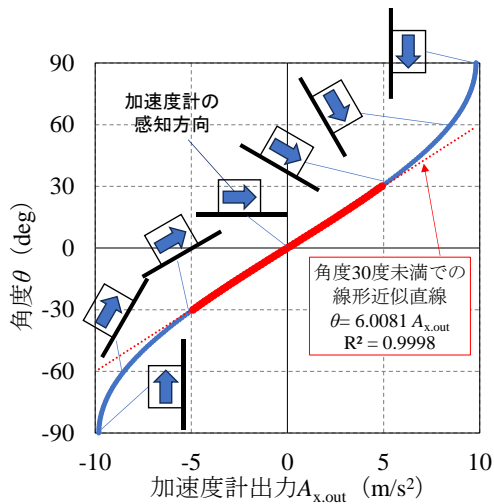


図-12 DC 対応加速度計による傾斜角の測定方法

### 7.3 加速度計を用いた傾斜角の測定

静的な実験においては、DC 対応の加速度計を用いることで直接的に傾斜角の測定を行うことができる。加速度計の測定値がゼロの状態（加速度に反応する方向が水平となる状態）から加速度計を傾けた場合の加速度計出力と傾斜角の関係を図-12 に示す。比較的傾斜角が小さい範囲については、加速度と傾斜角を線形関係で変換しても十分な精度を確保できることがわかる。

## 8. 画像解析による地盤内部の変位分布およびひずみ分布の測定

地盤工学分野の模型実験では、ガラス等の透明な側面を有する土槽を用いた 2 次元平面ひずみ条件の実験や第 3 回で紹介したアルミ棒積層体を用いた実験など、模型地盤内部を可視化した実験が多く行われ、図-13 のようなシステムにより画像が撮影されている。

かつては、フィルム写真を現像し、人間が手動で標

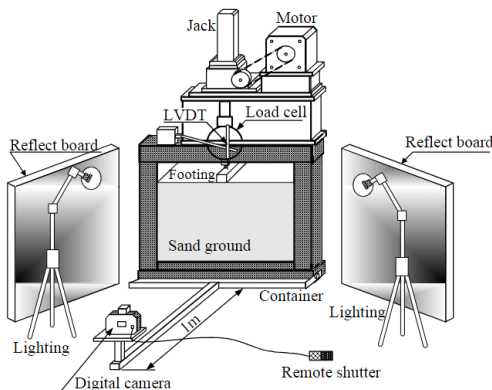


図-13 画像撮影システムの例<sup>9)</sup>

点の位置を読み取るような作業が必要であったが、現在ではデジタル画像の画素（ピクセル）情報に基づく画像解析技術が発達・普及しており、地盤内部の 2 次元的な変位分布およびひずみ分布を容易に測定することが可能である。また、第 3 回で紹介した透明地盤であれば、複数台のカメラを用いたステレオ撮影による 3 次元の変位測定も可能となっている（PTV 画像解析法）。振動実験を高速度カメラで撮影すれば、変位を微分することで速度や加速度を算定することもできる<sup>10)</sup>。

本章では、画像解析による地盤内の変位分布およびひずみ分布の測定技術について概説する。

### 8.1 標点を用いた変位・ひずみの測定

基本的な画像解析技術として、あらかじめ標点（マーカー）を設置しておき、標点を写真から直接追尾してその座標情報を得る方法がある。解析アルゴリズム上、どの点の変位をどのように計測しているのかが明確であり、画像解析結果の精度および妥当性の検証も比較的容易に行うことができる。そのため、不動点や基準点の測定、あるいは基礎や土留め等の部材の変位測定に有効である。一方、変位測定点（すなわち標点設置箇所）の数には模型製作作業上で限界がある。

地盤中への標点の設置方法としては、メンブレン等の摩擦低減層自体に標点を記載しておく方法（図-14）や、土試料そのものを着色して標点とする方法のほか、リベット状の標点を土槽側面に設置する方法などがある。いずれの方法も標点と地盤が一体で動いていることが前提となる。

標点の追尾方法としては、手動追尾のほか、画像情報を 2 値化して標点を抽出してその重心を求める方法

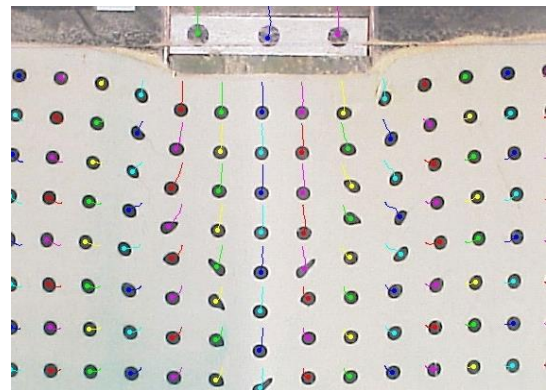


図-14 標点を用いた地盤変位測定結果の例<sup>11)</sup>

(図-14) や、十字状の標点を用いてその交点を求める方法（地盤中への標点設置は難しいが固定点や部材の変位測定には適する）などがある。市販ソフトウェアにも様々な方法が実装されており、画素寸法よりも小さい精度（一般に「サブピクセル精度」と呼ばれる）での変位計測が可能なものもある。

地盤内に標点を比較的高密度に配置して、変位分布を求めることができた場合には、それらの変位勾配を介してひずみを求めることができる。この変位からひずみへの変換作業は、基本的には有限要素法で節点変位からひずみを求める作業と同一である。

## 8.2 標点を用いない変位・ひずみの測定

標点を用いない方法の基本原理は、模型地盤の土粒子の僅かな色調や輝度の違いに着目し、変形前後のパターンマッチングによって変位を追尾するものである。近年では主に他分野で用いられている市販の PIV 法<sup>11)</sup>や DIC 法<sup>12)</sup>等の画像解析ソフトウェアを模型地盤の変位測定に適用する事例も増えている。標点を用いる方法に比べて、変位測定点を高密度に配置可能であるため特にひずみ測定に適しているが、使用するパラメータの設定次第で画像解析結果が大きく変化する場合があります。解析アルゴリズムが複雑であるため画像解析結果が妥当であるかどうかの判断が難しい。

以下では、支持力実験の様に大きな変形が局所的に生じる地盤工学分野の現象への適用を想定して開発された画像解析手法 (TN-SKIP)<sup>12)</sup> を例として、画像解析のアルゴリズムを概説した上で、同じ画像から異なる解析結果が得られた事例について紹介する。

TN-SKIP による変位場の計測は、第一段階の画像の上に節点と要素からなるメッシュを作成し、各節点の第 2 段階以降の画像上で対応する座標を逐次的に求めて、節点変位と要素のひずみの算出を行っている。各節点の座標を求めるには、まず第  $i$  段階の画像の節点座標を前段階の解析結果から読み取る。その節点座標を中心に、 $(2n+1) \times (2n+1)$ 画素の大きさの画像要素を抽出し、これをテンプレートとする。次に第  $i+1$  段階の画像からある座標を中心に、同様に同サイズの画像要素を抽出し、これを試験画像とする。試験画像の抽出位置を変化させて、テンプレートと試験画像の類似性

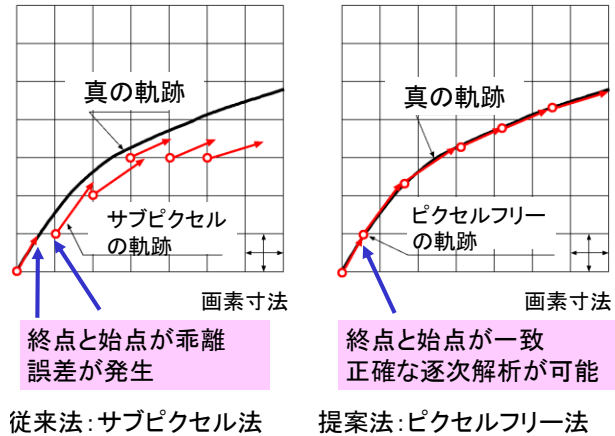


図-15 サブピクセルとピクセルフリーの違い

が最大となる点を探索し、第  $i+1$  段階におけるその節点の座標とする。類似性の判定には、例えば微小な画素要素の相互相関係数が用いられる。対象の変形が大きくなると、テンプレートと試験画像の類似性が低くなり、対応点を探索することが難しくなる。そのため、一連の変形計測では、多数の画像を撮影し、逐次的に画像解析を行い、各画像上の節点座標を更新していく必要がある。

画像データは画素（ピクセル）単位の情報であり、格子状に配置された平面的には離散的なデータである。そのため従来の方法では、節点座標も画素寸法による離散的な値となる。画素寸法よりも細かい分解能で変位を求める方法として、画素位置での相互相関係数が正規分布に従うものと仮定し、サブピクセルなピーク位置を推定して対応点を求める方法が PIV ソフトウェアではとられている。しかしながら多数の画像を用いて逐次的に変位を求める場合は、図-15 に示すように、ある段階で得られた変位ベクトルの終点ではなく、隣接した画素の格子点を次の段階の始点として扱うため、ステップごとに最大 0.5 画素の誤差が蓄積していくおそれがある。その問題を解決するために、画素の寸法によらず任意点を節点座標とする解析手法が開発されている<sup>13)</sup>。この解析手法では 0.001 画素単位で節点座標を入出力できることから、これをピクセルフリーと呼んでいる<sup>14)</sup>。

以下、ピクセルフリーとサブピクセル（ピクセルフリーの解析プログラムで入力する前段階の節点座標を 1 画素単位となるように劣化させて模擬）の比較を示



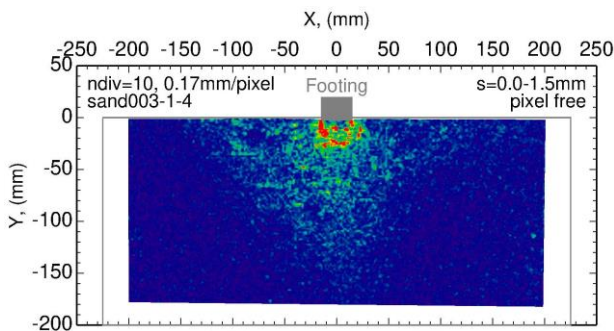
す。比較に用いた画像データは、豊浦砂の模型地盤表面に設置した基礎幅 3 cm の浅い帯基礎の重力場載荷試験の様子を、解像度 0.17 mm/画素の解像度で撮影したものである<sup>15)</sup>。探索アルゴリズム自体は同一であるため、1段階ごとの変位増分には大きな違いはないものの、解析の段階が進むにつれて図-15で説明した誤差が累積され、ピクセルフリーとサブピクセルの違いが顕著となる。

沈下量約 1.5 mm における最大せん断ひずみ分布を図-16に示す。これら比較すると、ピクセルフリーの結果では主働くさびにひずみが卓越し、その他の変形域では5~10%程度のひずみは発生しているものの、明確にひずみが卓越した領域はまだ見られなかった。一方、サブピクセルの結果では、主働くさびでのひずみに加え、基礎両端角からハの字状に左右に広がるようなひずみの卓越した領域が観察された。その反面、ピクセルフリーの結果ではひずみが発生しているも、サブピクセルの結果ではひずみの発生が見られない領域も存在する。これらの差異は画像解析から得られた変位分布がピクセルフリーでは連続的に変化するのに対

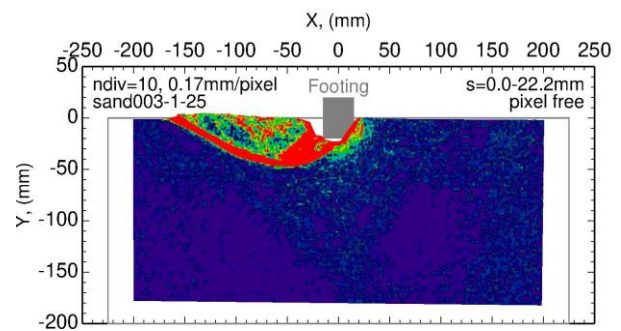
し、サブピクセルでは画素寸法の影響を受けてステップ状に変化することに起因している。すなわち、ひずみは変位を微分して求められるため、サブピクセルでは変位分布のステップ状の変化点で見かけ上ひずみが卓越し、その他の点では小さくなったためである。

図-17は写真を撮影した最終段階である沈下量約 22.2 mm における最大せん断ひずみ分布を示したものである。ピクセルフリーとサブピクセルの両者とも、すべり線やすべり土塊については類似した結果が得られている。しかしながらサブピクセルの結果では、変形の小さな領域では誤差の累積が大きく、変形の把握はむづかしい。一方、ピクセルフリーでは載荷初期の変形域の状態もそのまま保持されている。

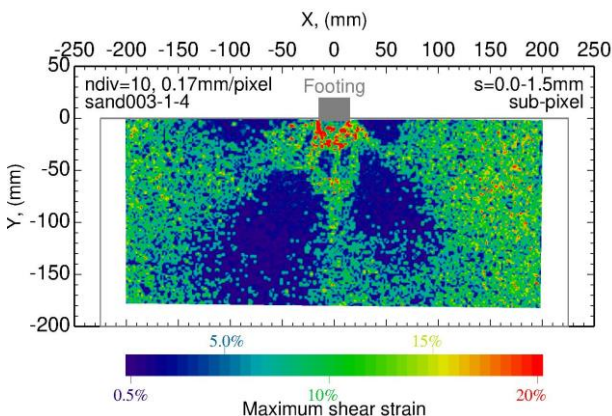
以上の比較から、サブピクセルでは剛塑性論的なメカニズムの把握には有効であるものの、弾塑性論的な変形の把握にはより精密なピクセルフリーな画像解析が必要であることがわかる。特にサブピクセルな手法による場合、変形が微小な段階では離散的な変位の計測値に起因する、ひずみの卓越域の誤検出に注意する必要がある。



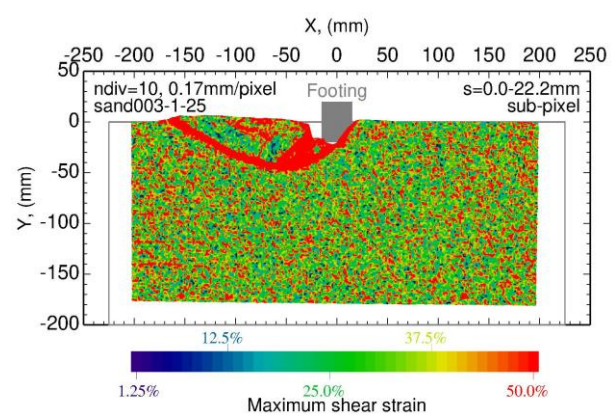
a) ピクセルフリー



a) ピクセルフリー



b) サブピクセル



b) サブピクセル

図-16 沈下量約 1.5 mm 時の最大せん断ひずみ分布

図-17 沈下量約 22.2 mm 時の最大せん断ひずみ分布

### 8.3 画像解析の精度確保のための基本事項

画像解析の精度は、基本的にはデジタルカメラの画素数に依存するが、画素数が多くなれば一つの画素に入る光量が減ってノイズが増える。実際には単に画素数の多さだけでなく、ピントのあったブレの少ない高解像度の画像を撮影するという基本的な写真撮影技術を磨くことが、画像解析による変位測定精度を高める上で最も効果的となる。

カメラが傾いている場合や模型に正対していない画像は、アフィン変換処理によって補正することも可能であるが、これらの補正により誤差・ノイズが生じるので、あらかじめこれらの補正を必要としないカメラ位置に固定するのが望ましい。民生用デジタルカメラの手振れ補正機能も使用しない方がよい。

写真には少なからずレンズの歪みが含まれるため、これが変位測定精度に大きく影響する<sup>注13)</sup>。一般には十分に離れた位置から焦点距離が長いレンズ（ズームレンズの拡大側）で撮影すればレンズの歪みの影響は小さくなる。ただし、焦点距離が長くなるほど、ピントの合う範囲が狭くなる（被写界深度が浅くなる）ため、画像全体でピントを合わせるためには、必要に応じて絞りを絞る（F 値を上げる）ことが有効となる。ただし、絞りを絞るほど、取り込む光の量が少なくなるため、ライト等で模型を明るく照らす必要が出てくることに注意を要する。

画像解析自体の再現性を確保するためには、これらの撮影条件を毎回同一に設定することも重要である。照明やカメラの位置を同一にするのは当然のことながら、カメラの設定はオートにせず、絞り、焦点距離、シャッタースピード等も毎回個別に指定するのがよい。

また、動的な模型実験に画像解析を適用する場合は、撮影間隔（フレームレート、fps<sup>注14)</sup>）およびシャッタースピードの設定が重要となる。撮影間隔は先に述べたデータ収録システムのサンプリング周期と同様に、測定対象とする現象の周期の1/10以下とする必要があるが、撮影間隔と撮影できる画質にはトレードオフの関係があることも同様である。シャッタースピードが遅いとブレが生じるが、シャッタースピードを速くすると取り込む光の量が少なくなるため、絞りを絞った時と同様にライト等で模型を照らす必要がある。

画像データの保存形式は、画像解析の精度の観点からすれば民生用カメラで一般的なJPEG形式（静止画）やMPEG形式（動画）は不可逆な圧縮フォーマットであるため避けた方がよく、BMP, TIFF, RAW等の非圧縮または可逆変換可能な静止画フォーマットで保存するのが望ましい。ただし、データ容量が大きくなるため、動の実験時の保存デバイスへのデータ転送速度や実験後のデータ保存時のハンドリングの問題とのトレードオフの観点でも判断する必要がある。

## 9. より良い実験を行うために

第4回では地盤工学分野における模型実験で一般的と思われる測定技術について概説した。どのような高価な測定方法を使おうとも、より良い実験を行うために最も重要な事項は、基本的な条件で想定された通りの測定結果が得られるかどうかなど、各測定方法の検証・キャリブレーションを着実に実施することである。また、複数手法で計測し、随時検証が可能な実験計画とするのが望ましい。

模型実験を計画していると、しばしば何かを測ろうとした時点で真実からは離れてしまうというジレンマにぶつかる。このジレンマの中で、良い模型実験をやりたいと思えば思うほど、「ソクラテスの無知の知」<sup>注15)</sup>や「シュレーディンガーの猫」<sup>注16)</sup>といった話を思い出す。模型実験は、とても哲学的な世界なのかもしれない。ソクラテスは「大切なのは、ただ生きるだけではなく善く生きること。」と言ったという。本講座が、「ただ実験するだけでなく、より良い実験をする」ことに役立てば幸いである。

注1) JIS Z 8103:2019「計測用語」では、ひずみゲージやロードセルは、「センサ」ではなく、「測定トランスデューサ」と定義されている。一方、市販品では「センサ」あるいは「変換器」と呼ぶ場合もある。本記事では初学者でも容易に理解できるようあえて「センサ」に統一して表記する。

注2) 長期測定に用いるスキャン方式の静ひずみ測定器のことをデータロガーと呼ぶメーカーのほか、サンプリング周波数10 Hz以上の同時サンプリング方式のものをデータロガーと呼ぶメーカーもあり、用語は統一されていない。

注3) センサ自体が仕様を保って測定できる範囲のことを、定格容量や定格範囲と呼ぶ場合がある。

注4) JIS Z 8103:2019「計測用語」では、「分解能」は、「対応する

指示値が感知できる変化を生じる，測定される量の最小の変化。」と定義されている。

注5) JIS Z 8103:2019「計測用語」では、「感度」は、「測定される量の値の変化に対する，測定システムの指示値の変化の比率。」と定義されている。

注6) 測定可能範囲を超える状態を「saturate する」が転じて「サチる」と呼ぶことがある。ただし，測定可能範囲を超えていなくても，実際の現象として何等かの頭打ちに達する状態のことを「サチる」という場合もあるので注意を要する。

注7) 梁理論上は曲率に材料のヤング率  $E$  と断面2次モーメント  $I$  を乗じれば曲げモーメントが求まるが，実際にはゲージ貼り付け精度等に起因した誤差を有するため，あらかじめ検定を行って，各ひずみゲージの出力と曲げモーメントの関係の直接求めておく方が精度がよい。

注8) 「区分的な多項式をある階数まで導関数が連続であるようにつないだ曲線を表わす関数」，理化学英和辞典，入手先 <<https://japanknowledge.com>>。(参照 2023-09-26)

注9) 重力加速度は，加速度計自体が運動して生じる正の加速度の方向に対して，負の加速度として測定される。

注10) LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 方式ともいい，コイル内の鉄芯の移動による電磁誘導を利用して変位を電圧に変換する。

注11) Particle Image Velocimetry の略で粒子画像流速測定法とも呼ばれる。主に風洞実験などの流体力学分野で普及している技術で，流体中の小さなトレーサー粒子群の画像の比較により流体の速度 (= 変位 ÷ 時間) と方向を測定する。

注12) Digital Image Correlation の略でデジタル画像相関法とも呼ばれ，固体表面にランダムな模様を塗装などで与えて変形前後の画像のパターンマッチングにより変位を求める。

注13) 市販の画像解析ソフトウェアには，あらかじめ格子状のチェッカーボードを撮影することでレンズの歪みによる誤差を補正する機能を搭載しているものがある。

注14) frame per second の略，民生用ビデオカメラは通常 30fps。

注15) 「自らの無知を自覚することが真の認識に至る道であるとする，ソクラテスの真理探究への基本になる考え方」，デジタル大辞泉，入手先 <<https://japanknowledge.com>>。(参照 2023-09-26)

注16) 「オーストリアの物理学者，E=シュレーディンガーが考案した量子力学に関する思考実験。ラジウムが  $\alpha$  粒子を放出すると毒ガスが発生する装置を猫とともに箱に収め， $\alpha$  崩壊の半減期を経過した後に猫の生死を問うもの。半減期を迎えた時点でラジウム原子核が崩壊して  $\alpha$  粒子を放出する確率は 50 パーセントであり，量子力学的には崩壊していない状態と崩壊している状態は 1 対 1 の重ね合わせの状態にある。一方，これを猫の生死と結びつけると，生きている状態と死んでいる状態を 1 対 1 の比率で重ね合わせた状態にあると解釈される。量子力学的な効果を巨視的な現象に結びつける際に生じる奇妙さを指摘したものとして知られる」，デジタル大辞泉，入手先 <<https://japanknowledge.com>>。(参照 2023-09-26)

## 参考文献

1) デジタル大辞泉，小学館，入手先 <<https://japanknowledge.com>> (参照 2023.8.14)

2) 真船和夫：観察，日本大百科全書（ニッポニカ），小学館，入手先 <<https://japanknowledge.com>> (参照 2023.8.14)

3) 今村眞一郎，野本 寿，斎藤禎二郎，上野勝利，藤井斉昭：土圧計測用小型門型ロードセルの設計と遠心模型実験への適用について，土木学会論文集，No.540/VI-31，pp.203-213，1996. [https://doi.org/10.2208/jscej.1996.540\\_203](https://doi.org/10.2208/jscej.1996.540_203)

4) 後藤 茂，青山 翔吾，劉 邦安，Luki Danardi，毛 無衛，東畑 郁生：大型土槽を用いた群杭模型実験における地盤挙動の計測（<特集>模型実験の動向），地盤工学会誌，Vol. 62，No. 9，pp.16-19，2014.

5) 佐藤剛司，龍岡文夫，生原 修，山田真一：2方向ロードセルの試作とその特性について，土木学会第38回年次講演会概要集第3部門，pp.285-286，1983.

6) 谷 和夫，龍岡文夫：砂地盤上の帯基礎底面の磨擦角測定に用いるロードセルの試作とその特性について，土木学会第40回年次学術講演会概要集第3部門，pp.775-776，1985.

7) 西岡英俊，神田政幸，館山 勝，村田 修，平尾淳一，樋口俊一：静的模型実験による鋼矢板併用直接基礎の鉛直支持力特性に関する研究，土木学会論文集C，Vol. 63，No. 3，pp.772-782，2007. <https://doi.org/10.2208/jscej.63.772>

8) 菊池喜昭：軟弱粘性土地盤着底くし形構造物の横抵抗特性に関する研究 3章 曲げモーメント分布により杭に作用する地盤反力分布を推定する方法，港湾空港技術研究所資料，No.1039，pp.15-25，2003.

9) LIU Yujian, SRENG Sokkheang, 望月秋利，上野勝利，坪井祐也：重力場，遠心場における水平砂地盤上基礎の支持力実験と変形挙動計測，地盤工学ジャーナル，Vol. 2，No.3，pp.139-148，2007. <https://doi.org/10.3208/jgs.2.139>

10) Takano D, Morikawa Y, Takahashi H: Full field measurement of liquefied soil on geotechnical centrifuge using digital image correlation, Proceedings of 8th international conference on physical modeling in geotechnics, Vol. 1, pp. 295-300, 2014.

11) 西岡英俊，神田政幸，館山 勝，喜多直之，平尾淳一，樋口俊一：静的模型実験によるシートパイル基礎の水平抵抗メカニズムに関する研究，土木学会論文集C，Vol. 64，No.2，pp.383-402，2008. <https://doi.org/10.2208/jscej.64.383>

12) Ueno, K., Sreng, S., Kobayashi, K.: Surface Kinematometry by image processing for geotechnical model tests, Proceedings of 8th international conference on physical modeling in geotechnics, Vol. 1, pp. 337-343, 2014.

13) 上野勝利，李 元海，SRENG Sokkheang，貞野哲也，萩原敏行，手塚直人：サブピクセル精度をもつ相互相関法の2次元模型実験への適用，日本実験力学会講演論文集，No. 2，pp.256-261，2002.

14) 上野勝利：技術手帳 ピクセルフリーな画像解析による変形計測，地盤工学会誌，Vol. 64，No. 6，pp.41-42，2016.

15) 上野勝利，李 元海，萩原敏行，今村眞一郎，望月秋利：サブピクセル精度を持つ画像解析による局所化変形計測手法と模型実験への適用，第38回地盤工学研究発表会，pp.1585-1586，2003.

(原稿受理 2020.5.1)