

# UAV を用いた災害現場における地盤強度推定の可能性に関する基礎的研究

## FUNDAMENTAL STUDY ON POSSIBILITY OF PREDICTION OF GROUND STRENGTH IN DISASTER SITES BY USE OF UAV

高橋 弘<sup>1</sup>・尾崎 成<sup>1</sup>・諫田 貴哉<sup>2</sup>・強矢 恭輔<sup>1</sup>・里見 知昭<sup>1</sup>

Hiroshi TAKAHASHI, Naru OZAKI, Takaya KANDA, kyosuke SUNAYA and Tomoaki SATOMI

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

<sup>2</sup> 東北大学大学院環境科学研究科 (現 大阪ガス株式会社)

**Key Words:** *Unmanned Aerial Vehicle(UAV) ground strength, impact force,*

### 1. はじめに

我が国では、近年、火山災害や大雨・暴風雨、地震活動に伴って多くの自然災害が発生している。例えば2011年に発生した東日本大震災、2014年9月に発生した御嶽山での火山噴火、同年8月に発生した広島での大雨による大規模土砂災害、2015年9月関東・東北豪雨による鬼怒川の堤防決壊、2016年4月に発生した熊本地震など枚挙に暇がないほど大規模自然災害が多発している。このように年々リスクの高まる大規模地震や頻発する風水害等の災害、人口減少・少子高齢化の進行と言った重要かつ喫緊の課題に対して、近年のICT技術を活用し、効率的な対応を可能とする技術の導入が強く求められてきている。

そこで、国土交通省と経済産業省は、「次世代社会インフラロボット現場検証委員会」を設置し、平成26・27年度に実際の災害現場にロボットを適用し、現場適用性を評価した<sup>1)</sup>。「次世代社会インフラロボット現場検証委員会」は、5つの部会から構成され、その中の1つである災害調査部会では、土砂崩落現場、火山災害現場およびトンネル崩落現場における調査ロボットの導入を目指した現場検証が実施された<sup>2)</sup>。自然災害が発生した場合、迅速な復旧作業が望まれるが、このためには被災地の状況をできるだけ早く把握することが極めて重要である。そこで、土砂崩落現場および火山災害現場では、人の立ち入りが困難若しくは人命に危険を及ぼす現場の「地形変化や状況を把握するための高精細な

画像・映像や地形データ等の取得」および「土砂や火山灰等の含水比や透水性、密度・内部摩擦角・粘着力、貫入抵抗などの計測」ができる技術・システムが公募された。現場検証の結果、地形データの取得に関しては、UAV (Unmanned Aerial Vehicle)を用いた地形計測は極めて有望な技術であることが確認され、平成28年度以降、現場実装が進められている。

このように、災害現場における迅速な状況把握および地形データ計測にUAVは極めて有効であり、今後の益々の活用が期待される。一方、現場実証委員会で公募されたUAVによる土砂サンプリングや含水比・地盤強度の推定に関しては有用な技術が見当たらず、今後の課題となっていた。UAVによる土砂サンプリングや含水比・地盤強度推定などが可能になれば、迅速かつ的確な災害復旧作業計画の構築が可能になると考えられるため、早急な技術開発が求められている。

本研究では、災害直後の状況把握・地形形状計測のためUAVが被災地上空を飛行する際に、地形形状計測と同時に地盤強度まで推定できるシステムの開発を目指し、その基礎研究として、UAVからの錘落下および棒状のコーン落下による地盤強度推定の可能性について検討した。

### 2. 落錘衝撃試験によるコーン指数の推定

施工現場では、コーン指数で地盤強度を評価することが多い<sup>3)</sup>。そこで、本研究では上空から地面に錘を落

下させ、地面に衝突する際の衝撃加速度からコーン指数の推定を試みた。一般にコーン指数はコーンの静的貫入により得られる値であるのに対し、本研究で用いる方法は動的試験であり試験の性質が異なる。しかし、衝撃加速度は地盤強度によって異なると考えられるため、衝撃加速度からコーン指数を推定できる可能性があると考え、本実験を行った。様々な土質による地盤強度を測定するために、マサ土、珪砂 9 号および珪砂と笠岡粘土の混合土の 3 種類の試料を用いた。混合土は、珪

砂9号と笠岡粘土を乾燥質量比2:1および3:1で混合したもので、粘着力を増やすために自然含水比状態で笠岡粘土の混合を行い、その後には含水比の調整を行った。各試料における試験条件を表-1に示す。表-1には後述するコーン指数の値も併せ示した。

本試験では衝撃加速度を経時的に測定するため、高応答小型加速度変換器 (KYOWA社製) を用いた。錘の形状は半球型とし、加速度変換器を接着剤で半球に固定した。作成した衝撃加速度測定用の錘を図-1に示す。錘はステンレスで作製されており、直径は8cm、質量は2.25kgである。

表-1 実験に用いた土試料

土	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	含水比 [%]	コーン指数 $q_c$ [kN/m <sup>2</sup> ]
マサ土	1.45	12.5	658.8
		15	338.0
		17.5	277.1
	1.65	15	751.0
		17.5	525.2
		20	117.2
珪砂	1.1	10	540.7
		25	423.6
	1.2	10	1085.0
		15	856.9
		20	958.3
		25	797.1
混合土 珪砂：粘土 =2:1	1.2	10	700.3
		12.5	619.6
		15	141.9
	1.3	20	187.0
		15	716.5
		20	331.2
混合土 珪砂：粘土 =3:1	1.2	5	529.8
		10	552.0
		12.5	493.4
		15	263.6
		20	170.5
		25	74.4
	1.3	15	434.8
		20	283.9
		25	155.5

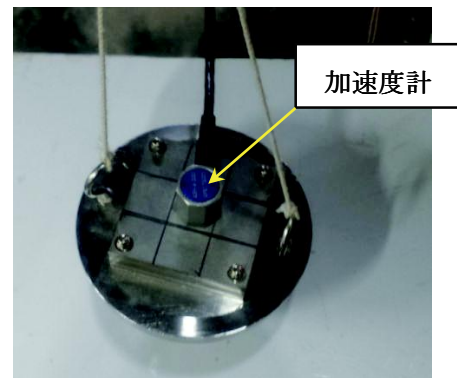


図-1 衝撃加速度計測用の錘

図-2に実験装置の概略を示す。滑車を用いて錘を糸で吊るして所定の高さに固定し、自由落下させて地盤に衝突させて衝撃加速度を測定した。使用する土槽寸法は一辺15.2cm、高さ12.5cmとし、その中に供試土を入れ、表-1の条件で地盤を作成した。土槽は2個用意し、同一条件で2つの地盤を作り、1つはコーン指数の測定に、もう1つは落錘衝撃試験に用いた。各供試土のコーン指数の値を表-1に示す。本実験で用いた加速度変換器の容量は±1000m/s<sup>2</sup>であり、また本研究は落錘による地盤強度推定の可能性について検討する基礎研究であることから、落下高さは地表面から50cmとした。

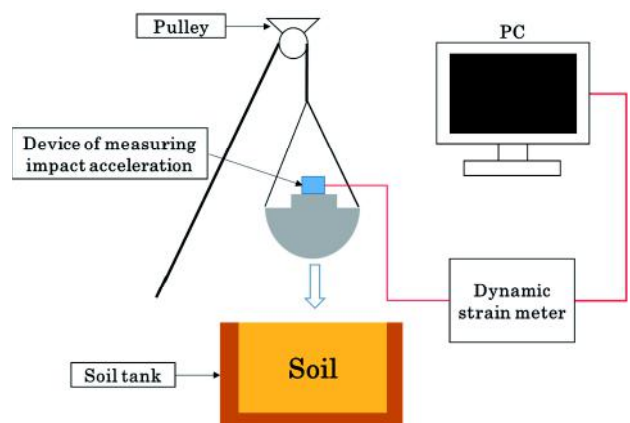


図-2 実験装置の概略

測定された衝撃加速度の一例を図-3に示す。これは、混合土2:1で乾燥密度 $1.2\text{g/cm}^3$ 、含水比15%の地盤に対する結果である。同一条件で複数回実験を行った結果、第1波形はほぼ同等の最大衝撃加速度を示したが、第2波以降は同一条件でもばらつきが見られた。そこで本試験では地盤に衝突した際の第1波形に着目し、図-3に示すように第1波形から測定された最大衝撃加速度 $I_{\max}$ 、衝突してから衝撃加速度の最大値に達するまでの時間（以下、上昇時間） $t_1$ 、衝撃加速度の最大値から衝撃加速度がゼロになるまでの時間（以下、下降時間） $t_2$ 、衝突開始から衝撃加速度がゼロになるまでの総時間 $t_3$ に注目し、地盤強度（コーン指数）との関係について検討した。

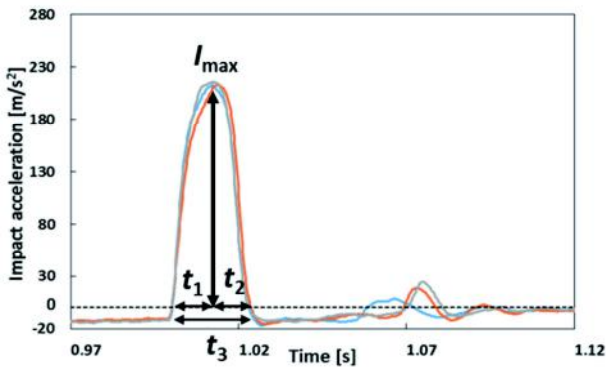


図-3 測定された衝撃加速度波形の一例

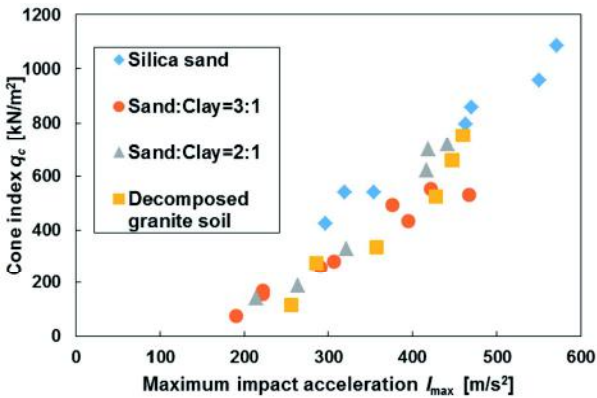


図-4 衝撃加速度とコーン指数との関係

最大衝撃加速度 $I_{\max}$ とコーン指数 $q_c$ との関係を図-4に示す。図-4よりコーン指数と衝撃加速度は正の線形相関関係をもつことが分かる。紙面の関係上、3つの時間パラメータとコーン指数との関係を示す結果は割愛するが、コーン指数の増加に伴い3つの時間パラメータは減少する傾向にあり、下降時間 $t_2$ と総時間 $t_3$ は試験条件によらずコーン指数と負の相関関

係となることが確認された。上昇時間 $t_1$ は硅砂9号のみ全体の相関関係に比べて異なる傾向を示したが、同様に負の相関関係となることが確認された。このように、各パラメータとコーン指数の間には相関関係が認められたことから、この4つのパラメータを組み合わせてコーン指数を推定する式の導出を行った。本研究ではコーン指数 $q_c$ を表す関係式を導出するにあたり、次の2式を想定した。

$$q_c = K \times \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

$$q_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i + \beta \quad (2)$$

ここに、 $q_c$ : コーン指数 [kPa],  $X_i (i=1,2,\dots,n)$ : 説明変数,  $\alpha_i (i=1,2,\dots,n)$ : 回帰係数 [-],  $K$ : 比例定数 [-],  $\beta$ : 定数項 [-] である。

式(1)および式(2)の各係数は重回帰分析を用いて算定した<sup>4)</sup>。式(1)については、線形モデルで表現するために両辺に自然対数に乗じて、以下の形とした。

$$q_c = \ln K + \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \ln X_i \quad (3)$$

説明変数の組み合わせは「最大衝撃加速度 $I_{\max}$ のみ」、「最大衝撃加速度 $I_{\max}$ と総時間 $t_3$ 」、「最大衝撃加速度 $I_{\max}$ と上昇時間 $t_1$ と下降時間 $t_2$ 」の3パターンで分析を行った。式(2)および式(3)のそれぞれに対して3パターンで分析を行い、計6つの相関式を得て、その決定係数 $R^2$ を比較したところ、次式に示すように、相関式として式(3)を用い、説明変数を「最大衝撃加速度 $I_{\max}$ と上昇時間 $t_1$ と下降時間 $t_2$ 」とした場合の決定係数が最も高くなることが分かった。

$$q_c = 4.54 \times 10^{-4} I_{\max}^{1.2528} t_1^{-0.1737} t_2^{-1.1017} \quad (4)$$

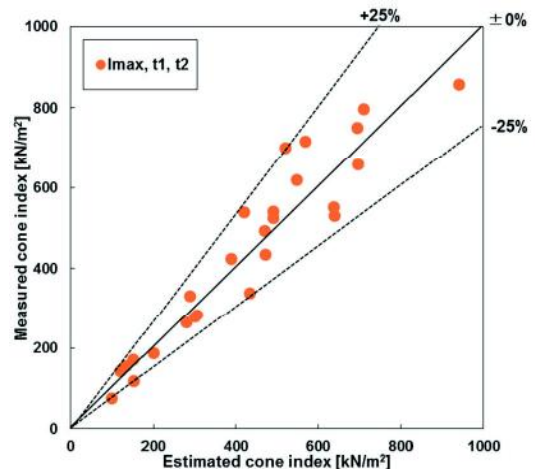


図-5 コーン指数の推定値と実験値との比較

式(4)から計算されるコーン指数の計算値と実験値の関係を図-5に示す。この図に示されるように、計算値と実験値は概ね±25%の範囲内に入っていることが分かる。すなわち、衝撃加速度の波形が計測できれば、その波形より最大衝撃加速度 $I_{max}$ 、上昇時間 $t_1$ および下降時間 $t_2$ を読み取り、式(4)よりコーン指数を推定できる可能性があることが確認された。

### 3. 無線計測装置の開発

第2章において、衝撃加速度の波形が計測できれば、その波形より地盤のコーン指数を推定できる可能性があることが確認された。そこで本システムの現場適用性を高めるため、無線の計測システムへの拡張を進めている。

はじめに、無線計測装置の開発を行った。図-6に無線計測装置の外観を示す。装置は錘の内部に加速度計、マイコン、電源、SDカードシールドが全て内蔵される形になっている。錘の直径は120 mmであり、PLA樹脂を用いて3Dプリンタで作成したため、計測装置の総重量は283gである。錘には3軸加速度計ADXL375を搭載することで、XYZ3方向の傾きおよび衝撃を計測可能とした。加速度計の容量は±2000m/s<sup>2</sup>である。なお加速度計の制御にはArduinoを用いた。Arduinoは、Arduino LLCにより開発されたAVRマイコンおよび入出力ポートを備えたオープンソースハードウェアである。これにSDカードシールドを搭載することで、加速度計からの信号をSDカードに記録することができるので、衝撃加速度の経時変化を計測することができる。

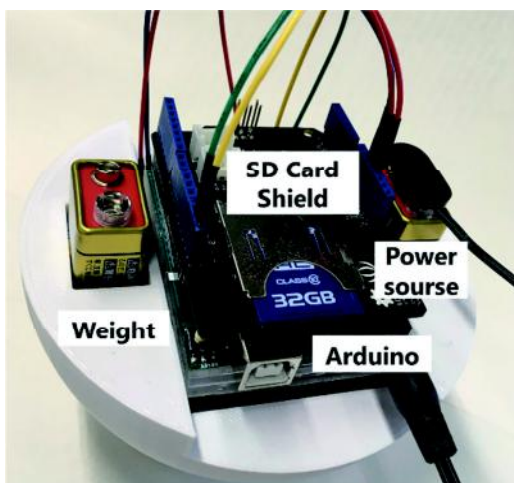


図-6 無線計測装置の外観

次に、開発した無線計測装置を用いて落下高さ50cmから錘を自由落下させ、衝撃加速度を計測した。実験には砂9号を用い、乾燥密度は1.2 g/cm<sup>3</sup>、含水比を5%刻みで10%から30%まで5条件で5回ずつ採取

した。無線計測装置のサンプリング周波数は10Hzとした。続いてすべての条件の土砂に対しコーン貫入試験を行い、コーン指数と衝撃加速度を比較した。また、新規実験装置の有用性を検討するため、有線計測装置で得られた衝撃加速度と、無線計測装置の衝撃加速度を比較した。

図-7に有線および無線計測装置によって得られた衝撃加速度とコーン指数の関係を示す。図中の■印は図-1で示した装置により得られた結果であり、▲印は、図-1に示す錘と加速度計付きのArduinoを用いて測定を行った結果を示している。また●印は、図-6に示す装置を用いた結果を示している。同じ錘を用いているにもかかわらず、▲印の値は■印の値に比べて全体的に小さな値を示しているが、これは使用している加速度計の性能の違いによるものと考えられる。ただし、▲が示す傾向と■が示す傾向は似ており、作成した無線計測装置でも地盤強度の推定は可能であると考えられる。一方、●印は▲印よりもさらに小さな値を示しているが、これは錘の質量が軽くなっているためである。図-6の装置は、錘を軽くしてUAVのペイロードを小さくする目的で作成したが、▲印の実験と同じ加速度計を用いているにもかかわらず、●印のバラツキは▲印に比べて大きくなっている。このバラツキは、錘が軽く、加速度計の容量に比べて最大衝撃加速度が小さくなり、誤差が大きくなったためと推察される。つまり、できるだけ正確なデータを収集するためには、ある程度の質量のある錘を使用する必要があると言える。

以上の結果より、適用範囲拡大のため計測装置のさらなる精度向上および改善が望まれる。

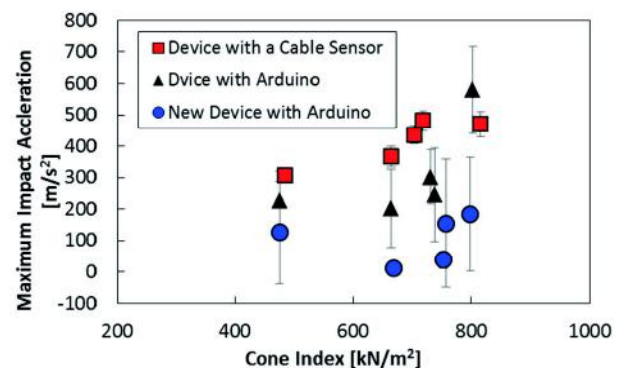


図-7 コーン指数と衝撃加速度との関係

### 4. UAV カメラを用いたコーン指数の推定

第2章では、上空から地面に錘を落下させ、地面に衝突する際の衝撃加速度からコーン指数の推定を試みた。本章ではUAV搭載のカメラを用いた地盤強度推定に関して行った基礎実験の結果について述べる。本研究では、現場で地盤強度を計測する方法の1つであるコ

ーン貫入試験をヒントに、棒状のコーンをUAVに搭載し、地盤強度を計測したい地点の上から棒状コーンを落下させ、地面に貫入した深さから地盤強度が推定できるのではないかと考えた。コーン貫入試験は静的貫入であり、本システムでは動的貫入になり両者に差があるものの、貫入したコーンの深さと地盤強度には相関関係があると推察される。本システムでは、コーンの貫入深さの計測が重要になるが、予めコーンの長さを把握しておき、地面から突き出したコーンの長さを計測できれば、コーンの全長から計測したコーンの長さを引くことにより、貫入深さを求めることができる。UAVにはカメラが搭載されているので、地面に貫入したコーン端部の3次元位置を画像処理により求めることができれば、コーンの長さを計測することができる。そこで、貫入したコーンの地面からの長さ、すなわちコーンの3次元形状計測が可能かどうか、また計測精度はどの程度になるか実験的に検討した。コーンが地盤に対してほぼ垂直に貫入する場合は必ずしも3次元形状計測は必要ないと思われるが、今後の研究において、コーンが地盤に斜めに貫入した際の地盤強度推定についても検討する予定であり、3次元で形状計測を行うことにした。

本研究では、空撮を行うために、DJI社製Phantom3 standardを使用した。またコーンの高さ計測には、Agisoft社製のPhotoScan professionalを使用した<sup>5)</sup>。このPhotoScanは、複数の写真をもとにポイント(点)で構成された3次元モデルを作成する点群作成ツールである。この3次元モデルは点の集合体でありポイントクラウド(点群)と呼ばれる。本研究では、この3次元モデルからコーンの高さ計測を行った。

図-8に使用した被写体の一例と作成された3次元モデルの一例を示す。この作成した3次元モデルは点で構成された点群であり、それぞれの点が3次元座標を持っている。そのため、露出した部分のコーンの長さは、この3次元モデルの寸法から求めることができる。被写体としては、長さ30cm、直径3cm、ボーダー幅(紅白の部分の長さ)5cmの円柱を使用した。実際にUAVからコーンを降下させる際には、空気抵抗や貫入時の抵抗などを考慮してコーンの先端部を流線型にする予定であるが、物体形状による3次元モデリングの挙動を調べるため、図-8(a)のような単純な形状と大きさに設定した。計測では、事前に長さ5cmと判明している垂直方向のボーダーを基準とし、3次元モデル上での全体の高さを求め、実寸法と比較した。実験では、まず高度5mからカメラの俯角を90度(鉛直下向き)に設定して63枚の画像を撮影したが、地形の表面形状の再現性は高かったものの、対象物の円柱自体を3次元モデリングすることができなかった。この理由は、カメラの俯角が90度と大きかったため、円柱に対して垂直方向の像を、カメラのイメージセンサに結ぶことができなかったためであると考えられる。この結果を基に、本実験ではカメラ

の俯角を小さくして被写体に対して円を描くように囲んで空撮する方法を採用した。カメラの俯角を45度とし、高度5mから21枚の画像を撮影して作成した3次元モデルが図-8(b)である。写真枚数が少ないためか点群に多少欠損が生じているものの、実際に細長い円柱を3次元モデリングすることができた。

そこで、次に撮影高度を5, 7, 10mに変化させ、空撮の際のカメラの俯角を45度, 60度, 75度に変化させて撮影を行った、ただし、オーバーラップ率およびサイドラップ率はともに90%とした。なお、本実験では、コーンの形状の影響についても調べるために、図-8(a)で示す円柱コーンの他に図-9に示す角柱状のコーンも用いた。角柱コーンの1辺は3cm、長さは30cmである。(a)と(b)・(c)の違いは、(a)は幅5cmの赤・白・黄・青のテープで4面を覆っているが、(b)・(c)は側面にも特徴点を設けるため、色の違うテープで被覆したものである。(b)は暖色、(c)は寒色とした。

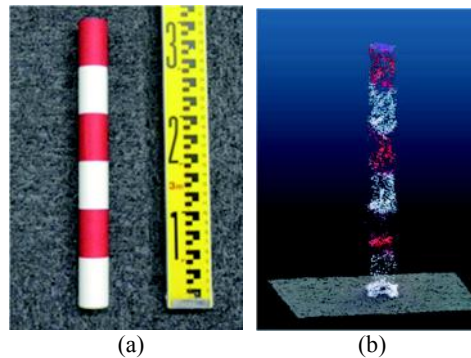


図-8 実験に使用したコーンと3次元モデル

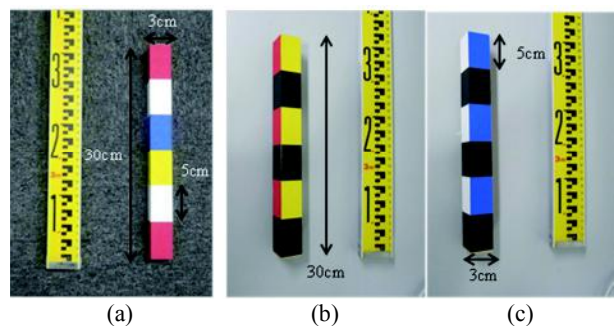


図-9 実験に使用した角柱コーン

実験結果の一例を図-10に示す。縦軸は3次元モデルで求めたコーンの高さを実際のコーンの長さの差を示している。撮影高度は7mであり、写真枚数はいずれも25枚である。この図より、角柱コーンの方が円柱コーンより誤差が小さく、俯角が45°の場合、角柱コーンの誤差は0.5mm以下であった。一方、円柱コーンの場合は、俯角が75度になると誤差が大きくなることが分かった。またいずれの場合も、カメラの俯角が大きくなるほど(鉛直下向きに近づくほど)、誤差が大きくなることが確認された。

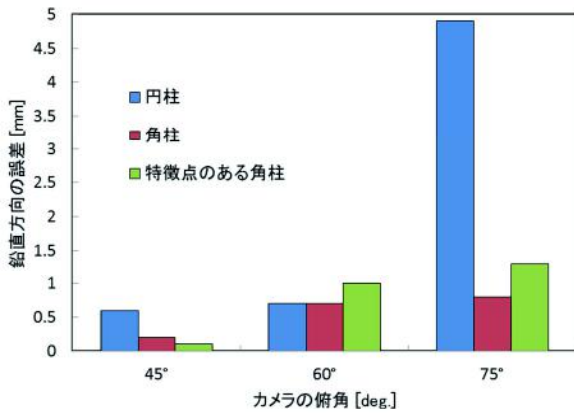


図-10 実験結果の一例

次に対空標識の有無および写真枚数が誤差に及ぼす影響について検討した。対空標識とは、UAVによって撮影された空中写真と地上との関係を明らかにするため、地上に設置する形状・寸法既知の標識のことである。本研究では、対空標識は10cmおよび20cmの正方形の板とし、地表に設置した。災害現場での適用を考えると対空標識の設置が不要の方が望ましいが、ここでは対空標識の影響を調べるために使用した。なお、高度は10m、カメラの俯角は45度とした。結果の一例を図-11に示す。写真枚数が20枚程度の場合、誤差がかなり大きくなるのが分かる。また写真枚数が多い場合、対空標識がない場合の方が誤差は小さくなった。これは、カメラの俯角が小さいため、地表に設置した板を基準とするよりも、角柱コーンの側面の5cm幅のテープを基準にした方が、作成される3次元モデルの精度が良いためであると考えられる。災害現場への適用を考える場合、対空標識の設置が不要である方が望ましいため、災害現場では、カメラの俯角を45度程度に設定し、角柱コーンの周りを円を描くように飛行して写真撮影を行い、80枚程度撮影し、コーン側面のテープ幅を基準に3次元モデルを作成することが望ましいと判断される。

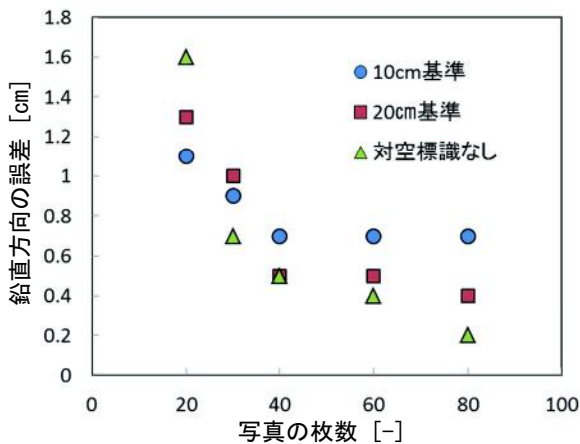


図-11 写真枚数と誤差の関係

#### 4. むすび

土砂災害現場では、UAVが被災地上空を飛行し、被災地の状況把握・地形形状計測に活用されている。一方、UAVによる土砂サンプリングや含水比・地盤強度推定などが可能になれば、迅速かつ的確な災害復旧作業計画の構築が可能になると考えられるため、地形形状計測と同時に地盤強度まで推定できるシステムの開発を目指し、その基礎研究として、UAVからの錘落下および棒状のコーン落下による地盤強度推定の可能性について検討した。その結果、上空から錘を地面に落下させた際の衝撃加速度の波形が計測できれば、その波形よりコーン指数を推定できる可能性があることが確認された。

また別の計測方法として、UAVを用いた画像撮影の簡便性に鑑み、UAVから棒状のコーンを地面に落下させ、その貫入深さからコーン指数を推定するための基礎実験として、画像処理によるコーンの高さ計測を実施した。その結果、カメラの俯角、撮影方法、オーバーラップ率などを適切に設定すれば、高い精度でコーンの高さを計測することが可能であることが分かった。今後、実際にコーンを落下させ、貫入深さとコーン指数との関係について実験的に検討する予定である。さらに落下高さ、地盤貫入時のコーンの傾斜がコーン指数推定に及ぼす影響についても検討する予定である。

謝辞：本研究は、(一社)東北地域づくり協会の技術開発支援事業により実施されたことを付記し、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会，[http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei\\_constplan\\_fr\\_000024.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_fr_000024.html)，2014.
- 2) 高橋 弘：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進－災害調査部会における現場検証の紹介－，日本ロボット学会誌，Vol.34，No.8，pp.515-518，2016.
- 3) 八十島 義之助：土木工学通論，p.188，1968.
- 4) 杉山 高一，藤越 康祝，小椋 透：多変量データ解析，pp.110～167，2014，朝倉書店.
- 5) <https://oakcorp.net/agisoft/>，2018

(2018. 5. 18 受付)