

論文 コンクリート荷卸し時の画像による品質管理に関する研究

新村 亮^{*1}・田中将希^{*2}・谷中郁哉^{*3}

要旨：ワーカビリティの低下したコンクリートを打込むことは充てん不良等の初期欠陥の原因となり、荷卸し時にコンクリートのワーカビリティを連続的に管理する技術が必要である。そこで、アジテータ車のシュート上を流下するコンクリートの表面性状、シュート先端からポンプ車ホッパー上に落下し堆積したコンクリートの形状から AI の深層学習機能を使ってスランプの推定を行った。また、シュート上を流下するコンクリートの流速分布を画像解析によって求め、流速の平面分布、流速の時間的な変化からスランプの推定を行った。

キーワード：品質管理、スランプ、画像、深層学習、流速

1. はじめに

コンクリートの品質、特にワーカビリティはコンクリート材料の品質、砂の表面水率の変動によって影響を受ける。また、コンクリート製造工場からのアジテータ車による運搬中にもワーカビリティが低下する。ワーカビリティが低下したコンクリートを打ち込むと充てん不良や豆板などの初期欠陥が生じる可能性が高くなる。また、圧送配管の閉塞による打設中断により、コールドジョイント発生の可能性もある。

例えば土木学会コンクリート標準示方書によるとコンクリートのワーカビリティの管理は 20～150m³ 毎の荷卸し時のスランプ試験によって行われる。さらに荷卸し時に随時、コンクリートのワーカビリティを技術者が目視で確認することとなっている¹⁾。スランプ試験は抜き取り試験であり、試験間の品質変動は把握できない。目視による確認には技術者の高度な経験が必要となる。

アジテータ車によるコンクリート運搬中にスランプを管理する技術にはドラム内部に突出した棒状のプロープへのドラムの回転により流動するコンクリートの抵抗からスランプを推定する方法²⁾や、ドラム回転モーターの油圧の変化によりスランプを推定する方法³⁾などが研究されている。いずれの方法もアジテータ車毎に計測装置を設置する必要があり普及は進んでいない。

荷卸し時にコンクリートの全量を機械的に検査する方法として、高流動コンクリートの充てん性をメッシュ筋への通過性を利用して検査する方法が研究されている⁴⁾。しかし、この方法は高流動コンクリートにのみ適用でき、特殊な装置を必要とする。アジテータ車シュート上でのコンクリートの流動状況の動画から流動勾配の変化を求めスランプを推定する方法が提案されている⁵⁾。この方法はシュートの勾配や排出速度などの施工条件の影響を受けやすいと考えられる。

一方、コンクリート練り混ぜ時の状態の画像を AI により学習し、スランプを推定する方法も研究されている⁶⁾。

そこで、本研究では荷卸し時にアジテータ車シュート上のコンクリートの表面性状、及び、シュート先端からポンプ車ホッパー上に落下した際の堆積形状から AI の深層学習によりスランプを推定する検討を行った。さらに、シュート上のコンクリートの流動速度分布を画像解析により求め、流速の平面分布、時間変動に着目してスランプの推定を行い、ワーカビリティの異常なコンクリートを検出する技術を検討した。

2. 検討方法

2.1 荷卸し時のコンクリートの画像撮影

アジテータ車のシュート上のコンクリート流動状況の撮影には汎用のタブレットを使用した。動画は 1080P HD, 30fps で撮影した。カメラはシュート正面に三脚を立て、高さ 1.8m 程度にカメラを固定した。

撮影ケースを表-1 に示す。経時変化撮影では、ポンプ

表-1 撮影ケース

撮影分類	ケース名	工場	配合	スランプの範囲(cm)	撮影日
経時変化	A-1	A	30-12-20N	17.5～7.5	2/7
	A-2	A	30-18-20N	17.5～10.5	2/8
	B-1	B	30-12-20N	17.5～4.5	5/15
	B-2	B	30-12-20N	13.0～5.5	9/20
現場撮影	C	C	36-15-20N	15.0～16.5	5/9
	D	D	21-12-20N	11.5～12.5	11/1
	E	E	24-15-20N	16.0	9/24
	F	F	24-15-20N	14.0～16.5	10/17
	G	G	24-15-20N	15.5～17.0	10/17
	H	H	24-15-20N	17.0	10/17

*1 (株) 大林組 生産技術本部技術第一部上級主席技師 工修 (正会員)

*2 (株) 大林組 生産技術本部技術第一部課長 工修

*3) (株) 日立ソリューションズ モビリティソリューション本部

車に荷卸したコンクリートをアジテータ車のホッパーに圧送し、2 時間程度循環して、コンクリートの流動状況を 15 分ごとに 2 分間撮影し、同時にスランブを測定した。経時変化撮影では画像に日射の影響がない様にシュート上方にシートの日除けを設置した。撮影状況を図-1 に示す。また、実際の土木工事でのコンクリート圧送時に、ポンプ車ホッパーに荷卸しているコンクリートの撮影を行った。現場では日除けは行っていない。

2.2 コンクリート表面性状に着目したスランブ推定

ケース B-1 で撮影した画像の例を写真-1 に示す。スランブの低下にともない、流動するコンクリートの表面の凹凸が大きくなっていく様子がわかる。また、ポンプ車のホッパーに落下したコンクリートの堆積形状が大きくなっていくことがわかる。

動画から切り取った静止画を深層学習の人工知能 (AI) に学習させスランブを教師データとして、スランブの推定を行った。画像は図-2 に示す通り、シュートの中央と排出口付近の 2 箇所から切り取った。画像のサイズは前者が 150pixel×150pixel、後者は縦 300pixel×横 500pixel 程度である。

コンクリートはセメントの種類等により色調が変わるため、画像から色調の影響を排除し、凹凸を強調するため、グレイ化、ヒストグラム均一化処理を行った。2 分間の動画のうち最初から 2600 枚を学習用に、次の 300 枚を検証用に、最後の 100 枚を推定用に使用した (図-3)。

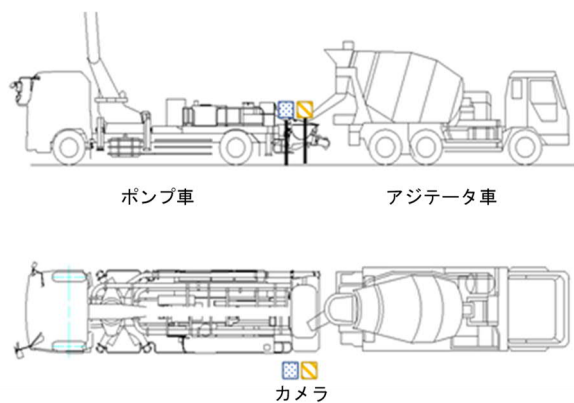


図-1 シュート上のコンクリート撮影方法（経時変化）

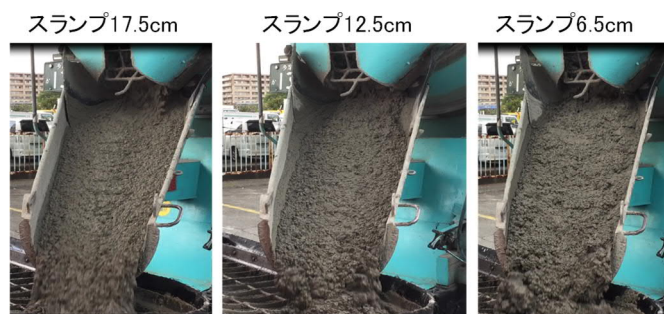


写真-1 撮影した画像例（ケース B-1）

AI 開発には Keras, Tensorflow を使用した。AI の概念図を図-4 に示す。AI ではスランブ（連続値）を回帰推定する様にした。

推定精度は平方根平均二乗誤差 RMSE (式(1)) により評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum (\hat{x}_i - x_i)^2 \right)} \quad (1)$$

N : 推定値の数, $\hat{x}_i$: 推定値, x_i : 測定値

2.3 シュート落下部堆積形状を用いたスランブ推定

シュート先端からポンプ車ホッパー上に落下した際の形状を分類し、スランブとの関係を検討した。形状の分類レベルを表-2 に示す。堆積形状用の画像の切り取り位置を写真-2 に示す。

学習用の画像の形状をレベル 1（堆積なし）からレベル 8（堆積特大、堆積後ポロポロ落下）までの 8 レベルに目視で分類し、堆積形状の画像と堆積レベルを AI が学習した。推定用の画像から堆積レベルを AI によって分類し、堆積レベルとスランブとの関係を検討した。

2.4 流速平面分布を用いたスランブ推定

スランブが変化した際のシュート上の流速平面分布のコンター図を写真-3 に示す。スランブが大きい(17.5cm)と上下方向の流速の差は小さいが、中央と左右両端とで 1.5 倍程度の流速差がある。スランブが中程度では上下方向で流速差が大きくなり、スランブが 8.5cm とさらに小さくなると上下方向で流速差が 1.5 倍となり、中央と左

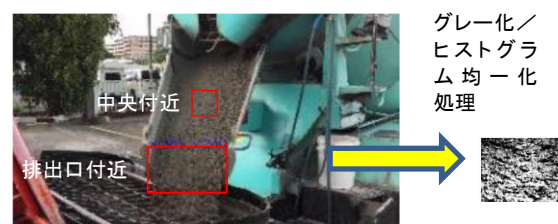


図-2 画像の切り取り位置、前処理方法

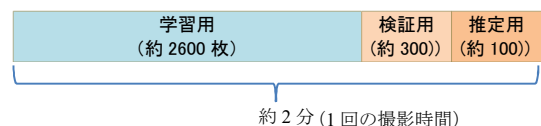


図-3 動画の利用方法

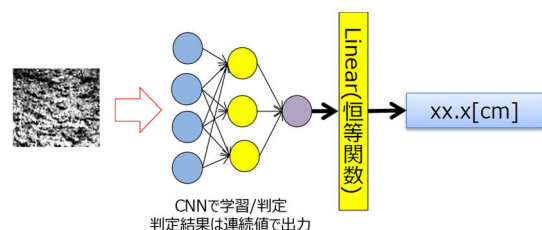


図-4 AI（深層学習）の概念図

右両端との流速差は逆に小さくなる。この様な流速平面分布の特徴に着目し、中央の流速に対する相対流速と、1秒間の流速の変動の大きさ（変動係数）を説明変数とし、スランプを目的変数として線形の重回帰式によるモデル化を行った。流速の画像解析には特徴点の追跡により速度を求める OpticalFlow を使用した。流速の抽出位置を写真-4 に示す。

2.5 流速時系列を用いたスランプ推定

ケース B-1 でのシュート上部中央での流速の経時変化を図-5 に示す。スランプ 14.5cm では流速は 12 秒程度の大きな周期性を示し、スランプ 4.5cm では細かな不規則変動を示している。

コンクリート流速の大きな周期の変動はアジテータ車のドラムの回転による周期的な排出のためと考えられ、スランプが小さくなるとシュートとコンクリートの摩擦が大きくなり、固まり状のコンクリートがシュート上をスリップする様に落下するため、大きな周期性が減衰するものと考えられる。

表-2 堆積形状の分類レベル

堆積レベル	参考画像	定義
0		堆積していない／流れていない（生コンなし、排出停止）
1		堆積していない（生コン範囲が小）
2		堆積していない（生コン範囲が中）
3		堆積していない（生コン範囲が大）
4		堆積している（小）
5		堆積している（中）
6		堆積している（大）
7		堆積している（特大）
8		堆積後ボロボロ落下

そこで流速の経時変化をフーリエ変換し、周波数スペクトル強度の特徴からスランプとの関係を検討した。

3. 検討結果と考察

3.1 コンクリート表面性状の変化を用いたスランプ推定結果

検討ケースと推定結果を表-3 に示す。学習・推定に経



写真-2 シュート落下部堆積形状画像の切り取り位置



写真-4 流速の抽出位置

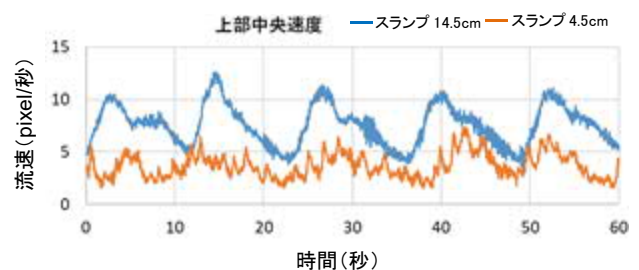


図-5 シュート上コンクリートの流速の経時変化例（ケース B1）

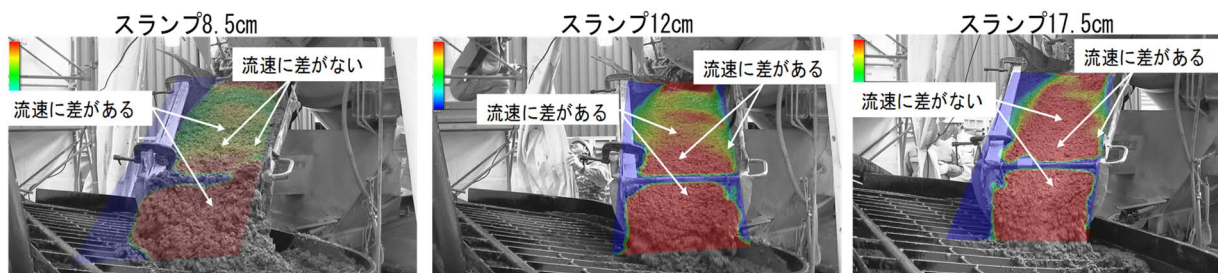


写真-3 スランプによるシュート上流速分布の変化

時変化データを用いた場合には、学習・推定に①同一コンクリートを用いた場合、②同一工場の異配合を用いた場合、③異工場の同配合を用いた場合、④同一工場の同配合を用いた場合、⑤複数工場・複数配合で学習した場合を検討した。また、現場画像で推定する場合には、⑥経時変化データのみで学習した場合と、⑦経時変化データと一部の現場データを使って学習した場合を検討した。

学習・推定に同一コンクリート、同一工場の同配合、また、複数工場の多種配合で学習した場合には RMSE が 2.5cm 以下で比較的推定精度は高くなったが、同一工場の異配合、異工場の同配合を用いた場合では RMSE が 2.5cm 以上で精度は低くなった。中央付近の画像に比べて排出口付近の画像を用いた方が精度はやや良好な結果となった。

現場データを推定する場合には経時変化画像のみで学習した場合には精度は低かったが、経時変化データと一部の現場データで学習することで精度が高くなった。

図-6～8 に排出口付近の画像を用いた推定結果の例を示す。スランプ試験の許容誤差である $\pm 2.5\text{cm}$ を管理上

下限値とした。条件③、⑥に比べ条件④、⑦の方が、推定精度が高くなっている。RMSE が 2.5cm 以下となる精度の AI が必要と考えられる。

この様にスランプが同じコンクリートでも、配合や材料が異なることで表面性状が変わるため、AI によるスランプの推定精度は高いものと思われる。また、撮影条件、特に排出速度や日射の影響も考えられる。しかし、現場でのスランプ推定を行う場合には、現場の一部データを学習することで、精度を上げられる可能性がある。

3.2 シュート落下部堆積形状を用いたスランプ推定結果

各ケースのスランプと AI によって推定した平均堆積レベルとの関係を図-9 示す。

スランプが低下するほど堆積レベルは増加する傾向はあるものの、同じスランプでも堆積レベルのバラツキは大きい。堆積レベルはアジテータ車の排出量やポンプ車ホッパー内の残存量などの影響を受けるためと考えられる。しかし、おおむねスランプが 10cm を切ると堆積レベルは 6.5 以上となり、ワーカビリティの低下したコンクリートを検出できる可能性があると考えられる。

3.3 流速平面分布を用いたスランプ推定結果

推定結果を図-10 に示す。ケース B-1 の 30-60 秒のデ

表-3 コンクリート表面性状を用いたスランプ推定精度

分類	学習・推定条件	学習データ	推定データ	スランプの RMSE(cm)	
				使用画像部位	
学習・推定に経時変化画像を用いた場合	①同一コンクリート	B-1	B-1	1.69	—
	②同一工場の異配合	A-2	A-1	3.47	3.21
	③異工場の同配合	B-1	A-1	3.99	4.22
	④同一工場の同配合	B-1	B-2	2.06	1.40
	⑤複数工場・多種配合で学習	A-1, 2, B-1	B-2	2.25	1.48
現場画像で推定した場合	⑥経時変化画像を学習	A-1, 2, B-1	D	-	4.38
	⑦経時変化と現場画像を学習	A-1, 2, B-1, C	D	-	2.01

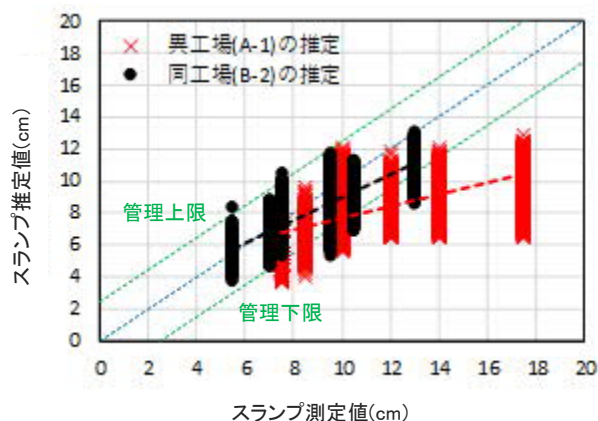


図-6 同配合の推定結果(条件③④, 学習データ B-1)

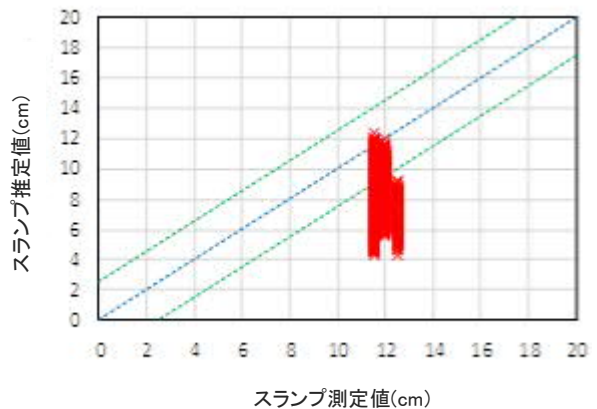


図-7 現場コンクリート(D)の推定結果
(条件⑥, 経時変化画像を学習)

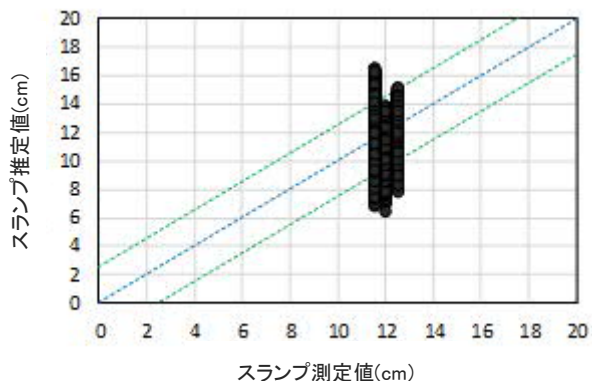


図-8 現場コンクリート(D)の推定結果
(条件⑦, 経時変化と現場画像を学習)

ータにより重回帰モデルを作成し、同一コンクリートのケース B-1, 異工場同配合のケース A-1, 現場データのケース C の 0-10 秒, 10-20 秒, 20-30 秒のデータを使用して精度の検証を行った。説明変数としては、種々の組み合わせを検討したが、上部、中部における左右の平均相対流速の中央との差と、上中部の中央の変動係数の合計 4 個の説明変数を使用したモデルが最も精度が高かった。

同一コンクリート、異工場の同配合（ケース B-1, A-1）では精度良く推定ができていますが、現場データでは精度が確保できなかった。現場の施工では排出速度が大きく変化することが原因と考えられる。

3.4 流速時系列を用いたスランプ推定

シュート上部中央の流速の周波数スペクトルの例（ケース B-1）を図-11 に示す。スランプが 14.5cm と大きい場合、0.3Hz 以下のスペクトル強度が大きく、スランプが 4.5cm と小さい場合、0.3Hz 以下のスペクトル強度が小さくなっている。スランプと 0~0.3Hz の平均スペクトル強度に対する 0.3~0.6Hz 平均強度の比との関係を図-12 に示す。

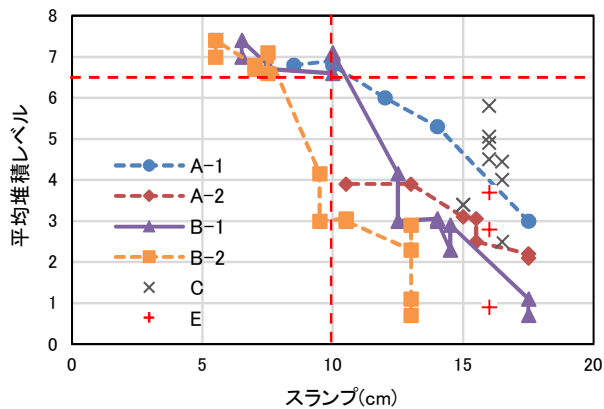


図-9 スランプと平均堆積レベルとの関係

特にスランプの値が小さい場合、スペクトル強度比のパラツキが大きい。これは排出速度のパラツキや配合による粘性の違いの影響と考えられる。しかし、スランプが小さくなるほど強度比は増加する傾向にあり、図中に点線で示す様にスランプが 10cm を下回ると強度比が 0.25 を上回ることが多くなっている。スペクトル強度比により、ワーカビリティが低下したコンクリートが検出できる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、荷卸し時、アジテータ車シュート上のコンクリート流動状況の画像から、AI や流速の画像解析等を用いてスランプを推定する検討を行った。本研究の結果をまとめると次の通りである。

- (1) シュート上を流れるコンクリートの画像を用いた AI によるスランプ予測は、同じ配合で学習した場合であれば精度良く行うことができる。しかし、配合や工場が異なった場合にはスランプの予測精度が低下する。現場での推定では多種類のデータに加え、現場で撮影したデータを追加で学習することで

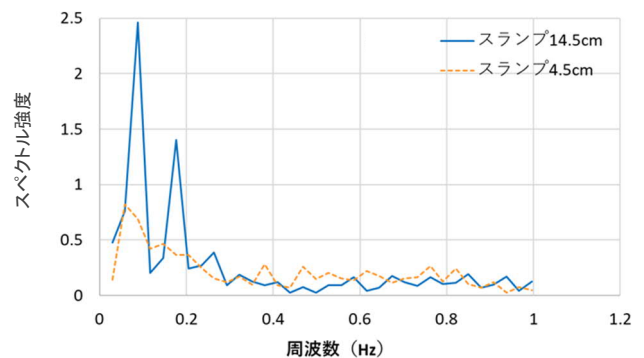


図-11 シュート上コンクリート流速の周波数スペクトルの例（ケース B-1）

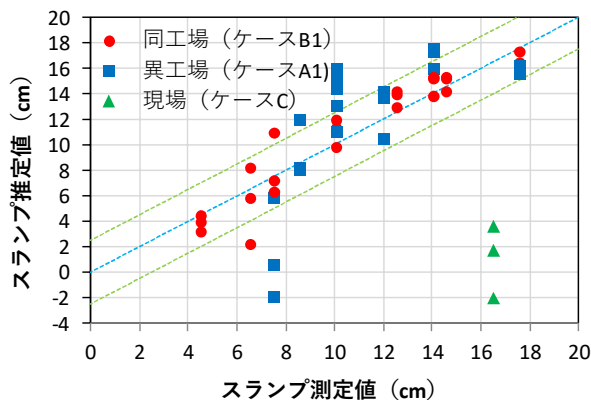


図-10 流速の平面分布と変動係数を用いたスランプ推定結果（ケース B1 を使用したモデル）

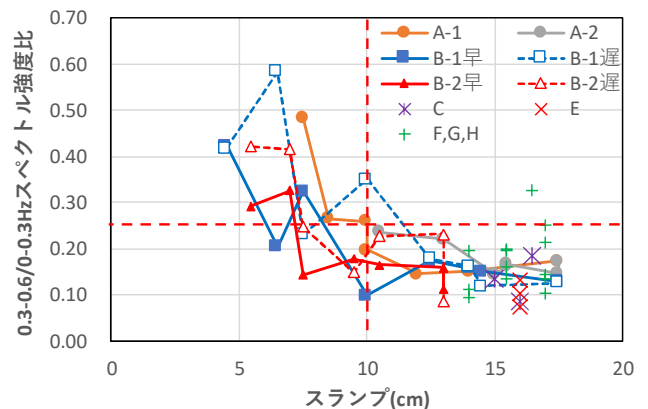


図-12 スランプとスペクトル強度比の関係

精度が向上する可能性がある。

- (2) シュート先端から落下したコンクリートの堆積形状から AI を用いて、ワーカビリティの低下したコンクリートを検出できる可能性がある。
- (3) シュート上を流れるコンクリートの流速の平面分布からスランプの推定ができる。しかし、配合や排出条件の影響を受ける。
- (4) シュート上を流れるコンクリートの流速の周波数特性からワーカビリティの低下したコンクリートを検出できる可能性がある。

今後、様々な条件での荷卸し画像データの蓄積を進め、現場でのスランプの推定精度を向上できる学習データの組合わせを検討し、ワーカビリティの低下したコンクリートを、配合や施工条件によらず、より確実に検知できる技術を確立したい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.203，2017
- 2) 曾我部直樹，廣藤義和，毛利彰仁，宮本充也，山田雅裕：アジテータ車に設置したプローブによるコンクリートの連続管理技術の適用性，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.70，pp. VI-378，2015
- 3) 新村 亮，新保学幸，川島 茂，高橋良光，中田健太：コンクリート運搬中のスランプ管理に関する研究，土木学会年次学術講演会概要集，Vol. 68，pp.V-388，2013
- 4) 大中英揮，木曾 茂，清水哲史，西田宏司：高流動コンクリートの打込み箇所における全量検査に関する実験，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.50，pp.1148-1149，1995
- 5) 倉田和英，松本修治，柳井修司，坂井吾郎，橋本 学，平 陽兵，片村立太：動画像解析を活用したフレッシュコンクリートの性状判定手法の検討，土木学会年次学術講演会概要集，Vo.74，pp.V-567，2019
- 6) 早野博幸，工藤正智，尾崎 奨，大木宗一：AI 技術を用いたフレッシュコンクリートのスランプ予測，土木学会年次学術講演会概要集，Vo.74，pp.V-505，2019