ベルトコンベヤー上の土砂の連続計測による乾砂量管理と土砂性状評価

(株)大林組　正会員○梅原　由貴　　(株)大林組　正会員　板場　建太
(株)大林組　正会員　近藤　由也　　(株)大林組　正会員　内橋　修一
(株)大林組　正会員　今井　哲也　　(株)大林組　正会員　東野　弘幸
(株)大林組　正会員　川下　大風　　エバ・ジャパン(株)　今村　翔之

1．はじめに

泥土圧シールドの安全な掘削には，掘削土砂の量および性状を常時把握し，その結果を切羽土圧の管理や添加材注入量の調整に反映することが重要である．

特に，地下水や添加材の影響を受けにくい乾燥重量（乾砂量）は重要な指標となる．従来，ベルトコンベヤーによる排土方式の泥土圧シールドでは，乾砂量の算出に土質試験が必要であり，人的負担が大きく結果取得に時間を要すことから，乾砂量によるリアルタイムの排土量管理は行われてこなかった．

一方，少子高齢化や熟練技術者の離職に伴い，省人化へのニーズが高まる中，大林組はシールド自動化システム「OGENTS®」[1]（**図-1**）の開発を進めている．

そこで筆者らは，泥土圧シールドにおける掘削土砂の自動搬出に関わる技術として，ベルトコンベヤー上を流下する掘削土砂の量および性状を連続計測可能な「掘削土評価システム」（**写真-1**）を開発した．本稿では，本技術の概要と実現場における計測結果について述べる．



図-1　シールド自動化システム「OGENTS®」

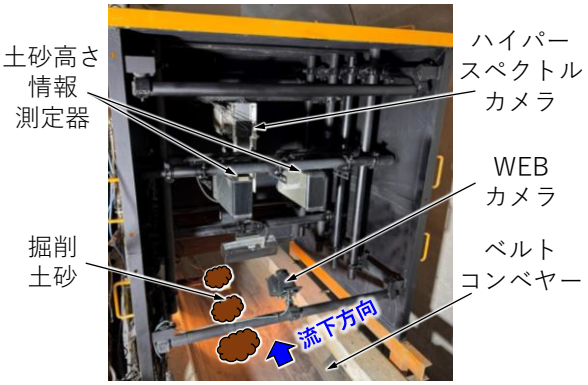


写真-1　掘削土評価システム

2．掘削土評価システムの概要

掘削土評価システム（**写真-1**）は，掘削土砂を運搬するベルトコンベヤー上に，ハイパースペクトルカメラ，土砂高さ情報測定器，WEB カメラの 3 種類の計測機器を設置するものである．ベルトコンベヤー上を高速（2m/s）で間欠的に流下する掘削土砂について，含水比，体積，土砂性状を，非接触でリアルタイムに 24 時間連続計測できる．計測機器の一覧を**表-1** に示す．各計測機器による計測概要を各節に示す．

表-1 掘削土評価システムの計測機器

計測機器	 ハイパースペクトルカメラ	 土砂高さ情報測定器	 WEBカメラ
計測原理	複数の赤外線波長の反射率計測 →事前作成した含水比との関係から含水比算出	レーザー計測 →高さのコンター画像とロジックによる性状分類	画像認識AIによる性状分類
出力値	・含水比	・体積 ・土砂性状	・土砂性状
計算値	・湿潤密度、乾砂量、乾燥密度 ※ベルトスケール取得値を用いる		

(1) ハイパースペクトルカメラによる含水比計測

ハイパースペクトルカメラは，計測対象物から反射される複数の赤外線波長の反射率を計測できるカメラである．人間の目では取得困難な波長の反射率も計測できる

キーワード　シールドトンネル，掘削土砂，含水比，土砂性状，乾砂量，ハイパースペクトルカメラ
連絡先　〒204-8558　東京都清瀬市下清戸 4-640 株式会社大林組 技術研究所 地盤技術研究部　ＴＥＬ050-3829-1520

ため（**図-2**）[2]，含水比等の人間の目では評価困難な物性の違いを可視化できる．

本技術で用いるカメラ（エバ・ジャパン社製 SIS-I）は，非接触で 50fps（frames per second）の速さで計測が可能である．1 秒ごとに含水比を算出する場合には，1 秒間の計測回数（50 回）の平均値を使用する．また，ベルト部分を認識し計測範囲から除外できる [3]．これらにより，大断面シールドのように土砂が高速かつ間欠的に流下する場合でも計測可能であることが特徴である．

本技術では，事前に土砂の NDSI 値（Normalized Difference Spectral Index：正規化分光反射指数，**式-1**）と含水比の関係式（検量線）を作成し，ベルトコンベヤー上に設置したハイパースペクトルカメラで土砂の NDSI 値をリアルタイム計測することで含水比を計測する [3),4)]．

$$NDSI = (I_{\lambda_2} - I_{\lambda_1})/(I_{\lambda_2} + I_{\lambda_1}) \qquad (式-1)$$

$I_{\lambda 1}$, $I_{\lambda 2}$：基準波長 λ_1，特徴波長 λ_2 の赤外線反射率

含水比による変化を捉えるため，水の赤外線吸収波長帯を考慮し，λ_1 と λ_2 はそれぞれ 1350nm, 1450nm とした．

ベルトコンベヤーを用いた小規模実験により，含水比の異なる土砂を連続的に流下させた際の計測結果を**図-3** に示す [4]．含水比約 15%の土砂は暖色で，含水比約 45%の土砂は寒色で表示され，含水比の違いを確認できた．

さらに，計測含水比とベルトスケールで計測した湿潤重量を組み合わせることで，乾砂量の連続算出とリアルタイム管理が可能となる．

(2) 土砂高さ情報測定器による体積計測，土砂性状分類

土砂高さ情報測定器は，高精度なレーザースキャナで，ベルトコンベヤー上を流下する掘削土砂を連続的にスキャニングし，土砂体積と高さのコンター画像を出力する．

現場で体積計測に用いられるレーザースキャナと比較すると，より高精度な体積計測が可能である．本技術では，体積計測箇所のベルトのたわみを抑制するとともに，ベルト速度をエンコーダにより直接計測して体積計算に用いることで更なる精度向上を図った．

小型ベルトコンベヤーを用いて，体積が既知の矩形ブロックの計測を行った（**写真-2**）ところ，10 回の繰返し計測を行った際の精度は，ばらつき 1σ＝1.0～2.0%，正確度＝0.97～0.99 となり，高精度に体積を計測できた．

また，土砂高さのコンター画像（**図-4**）を用いて土砂性状を分類する．粘性土はベルトコンベヤー上で塊状に

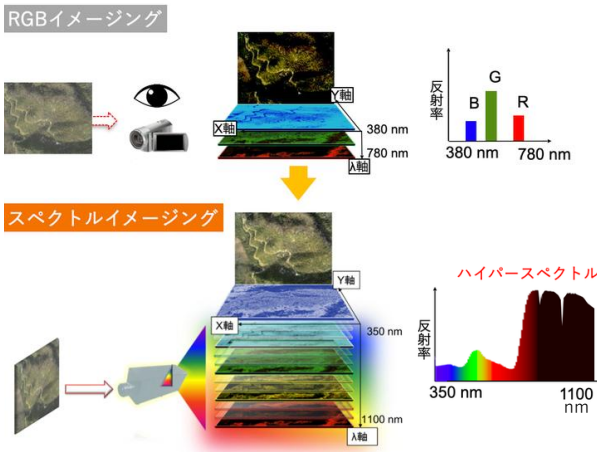


図-2　ハイパースペクトルとは[2)]

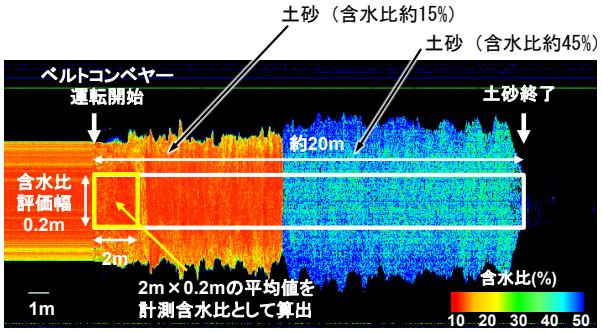


図-3　小規模実験による含水比計測結果 [4)]

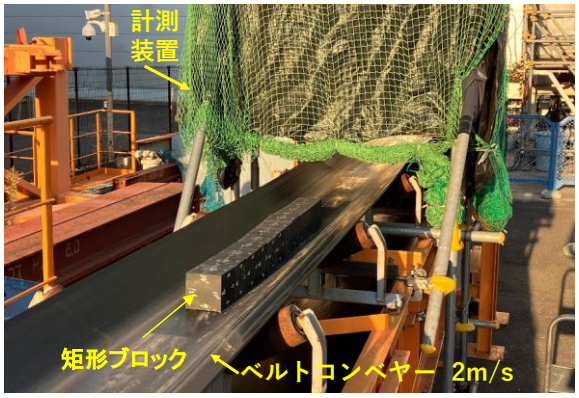


写真-2　矩形ブロックの体積計測

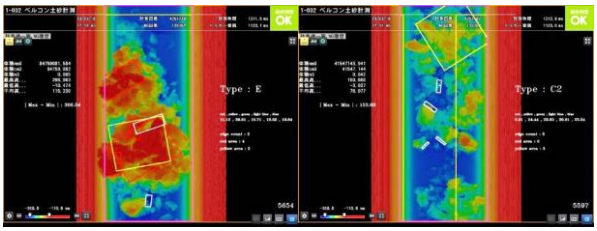


図-4　土砂高さ情報測定器により得られるコンター画像例（左：粘性土，右：砂質土）

表-2　高さコンター画像による土砂性状分類[5)]

分類	想定する土砂性状
A	軟弱土（土砂が流動化）
B	砂質土（連続排土）
C	粘性土・粘性小（最高高さが小さい間欠排土）
D	粘性土・粘性大（最高高さが大きい間欠排土）

なり局所的に高さが大きい（**図-4** 左側）のに対し，砂質土は高さが均一になる（**図-4** 右側）ことを利用し，コンター画像の色の割合等の閾値を設定した独自のロジック[5]により，**表-2** に示す4つの土砂性状に分類する．

(3) WEB カメラと画像認識 AI による土砂性状分類

WEB カメラでベルトコンベヤー上の土砂を撮影し，見た目から画像認識 AI により**図-5** に示す 5 つの土砂性状とベルトに分類する．分類画面の例を**図-6** に示す．画像中赤枠の範囲が AI 判定領域である．事前に，複数現場で得た約 1,500 枚の画像を用いて学習させた．テスト用画像を与えた際の正解率は 0.96 だった．

(4) 本技術の特徴

本技術の特徴を以下に示す．

a) ベルトコンベヤー上を流下する土砂に対し，含水比，体積，土砂性状を非接触で計測，分類できる．

b) 大断面シールドのようにベルトコンベヤーが高速で稼働（2m/s 程度）し，掘削土砂が間欠的に流下する場合でも計測可能である．

c) 排土状況を主観によらない同一指標で連続的に監視できるため，土砂の変化をいち早く察知して噴発や閉塞の防止に役立つ．

d) 含水比の連続計測により，連続ベルトコンベヤー排土方式の泥土圧シールドでも乾砂量管理が可能である．

e) 土質試験や目視による評価を補完，または一部を代替することで省人化につながる．

３．現場計測の概要

実際のシールド現場（**写真-3**）に本技術を適用し，計測を行った．当該現場は，シールド外径約 12m，延長約 1.1km の連続ベルトコンベヤー排土方式の泥土圧シールド現場であり，計測を行った区間（100 リング～200 リング）の搬出土砂の例を**写真-4** に示す．

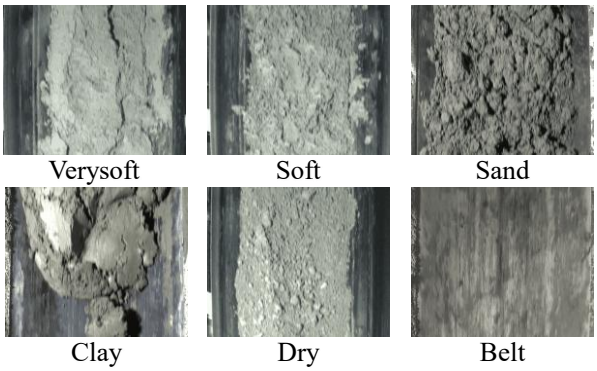


図-5　画像認識AIによる土砂性状分類

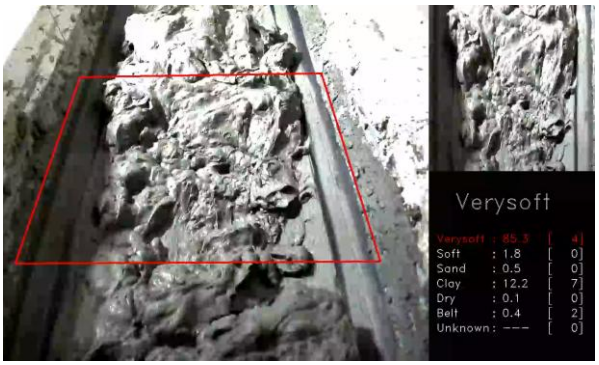


図-6　画像認識AIによる土砂性状分類画面



写真-3　計測を行ったシールド現場



写真-4 搬出土砂の例（155リング）

(1) 掘削地盤の特徴

今回計測を行った 100 リング～200 リングについて，工事施工前の地盤調査によって得られた地質縦断図と，10 リングごとの掘削断面の模式図を**図-7** に示す．100 リング～200 リング全体にわたって砂質土と粘性土の互層となっている．100 リングでは砂質土層と粘性土層が断面の 50%ずつ程度である．110 リング付近から 140 リング付近までは砂質土割合が減少していき，150 リング付近から砂質土割合が増加し，200 リング付近では砂質土が主体の断面構成が予想されていた．

実施工時は，カッタートルクや切羽土圧等の掘進データに加えて，本技術による乾砂量等の計測結果を確認しながら掘進を行った．150 リング付近からは粘土塊が出現し，排土設備で適切に排土するために掘進速度の調整を行いながらの掘進となった．掘削土砂の粒度試験結果を**図-8** に示す．計測した全区間にわたり，細粒分含有率 60～80%，砂分含有率 20～40%であり，礫分はほぼ検出されなかった．100, 150, 190 リング付近で細粒分含有率が 60%程度に低下し，砂分含有率が 40%程度に増加する傾向がみられた．地盤調査結果（**図-7**）から想定された 150~200 リングに向かって砂分が明確に増加する傾向はみられなかった．チャンバー内への鉱物系掘進添加材（加泥材）添加量を**図-9** に示す．加泥材を原地盤体積に対して 20%程度添加し，必要に応じて分散剤と浸透剤を併用した．

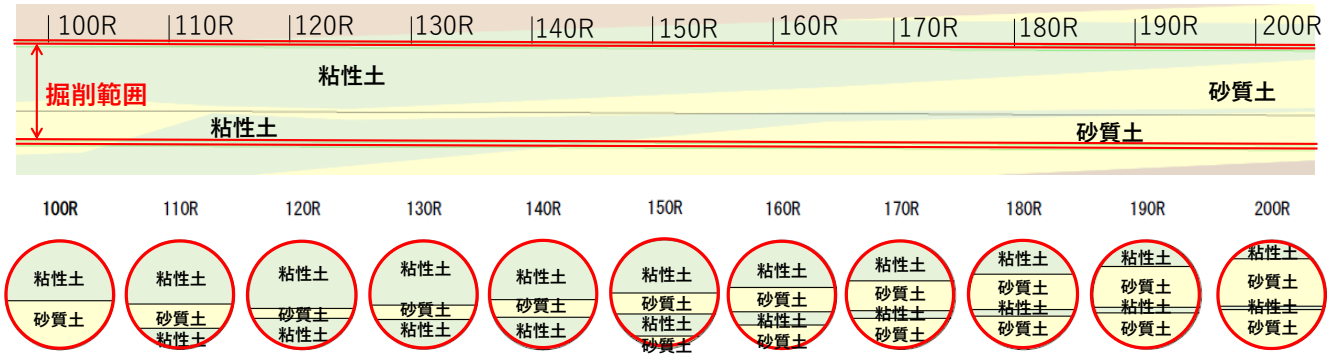


図-7 地質縦断図，掘削断面の模式図（100 リング～200 リング）

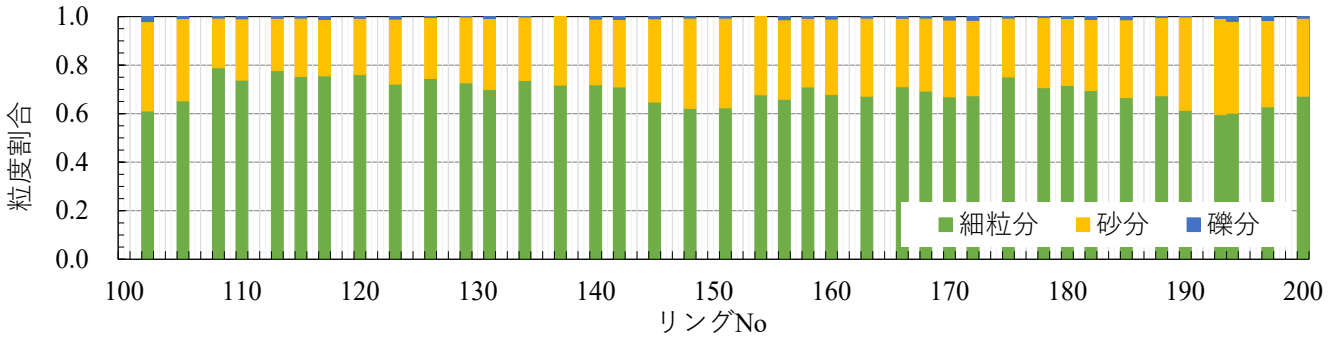


図-8 掘削土砂の粒度試験結果（100 リング～200 リング）

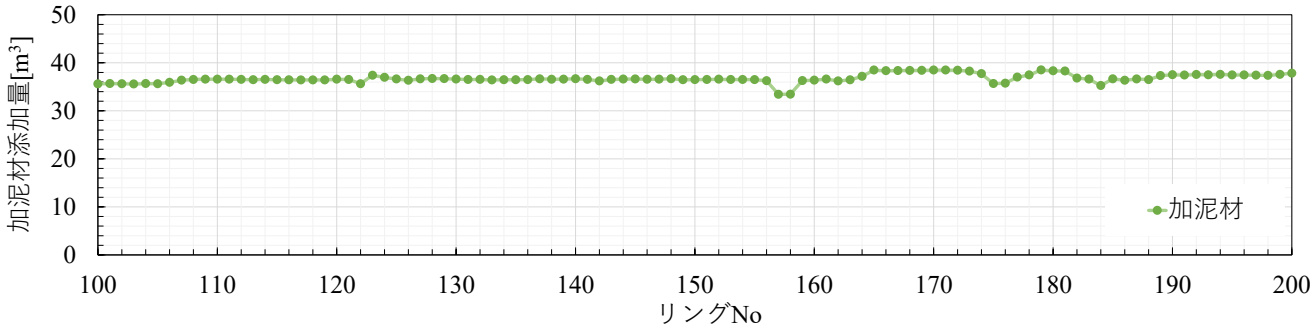


図-9 チャンバー内への加泥材添加量（100リング～200リング）

(2) 計測機器の設置

計測機器の設置位置と設置状況を**図-10**，**写真-5**，**写真-6** に示す．設置可能なスペースの問題から，**写真-1** のようにすべての計測機器を同一地点に設置する形ではなく，土砂高さ情報測定器と WEB カメラを中継ベルトコンベヤー上に(**写真-5**)，ハイパースペクトルカメラを計測用の架台に入れる形で連続ベルトコンベヤー上に設置した(**写真-6**)．中継ベルトコンベヤーの速度は 105m/min（1.8m/s），連続ベルトコンベヤーの速度は 170m/min(2.8m/s)である．計測頻度は 1 秒に 1 点とした．

4．現場計測結果

(1) 1 リング掘進中の連続計測結果

1 リング掘進中の連続計測結果の例として，200 リング掘進中の連続計測結果を**図-11** に示す．

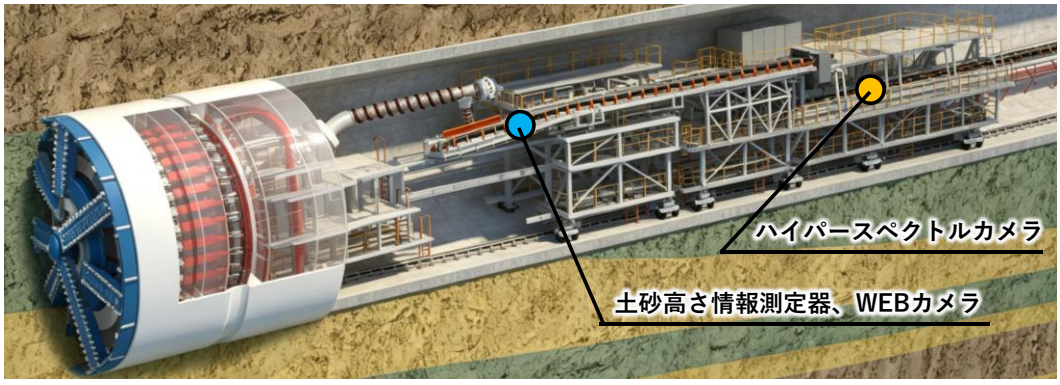


図-10 各計測機器の設置位置

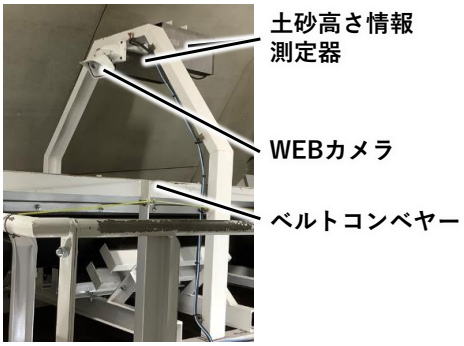


写真-5 土砂高さ情報測定器と WEB カメラの設置状況

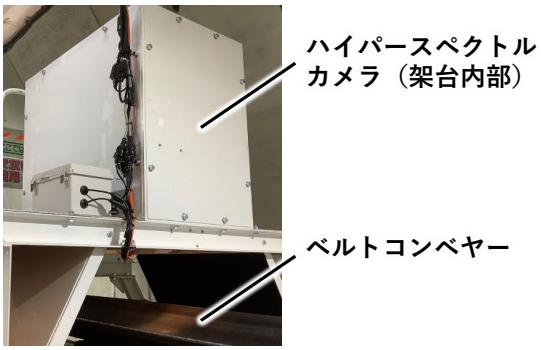


写真-6　ハイパースペクトルカメラ設置状況

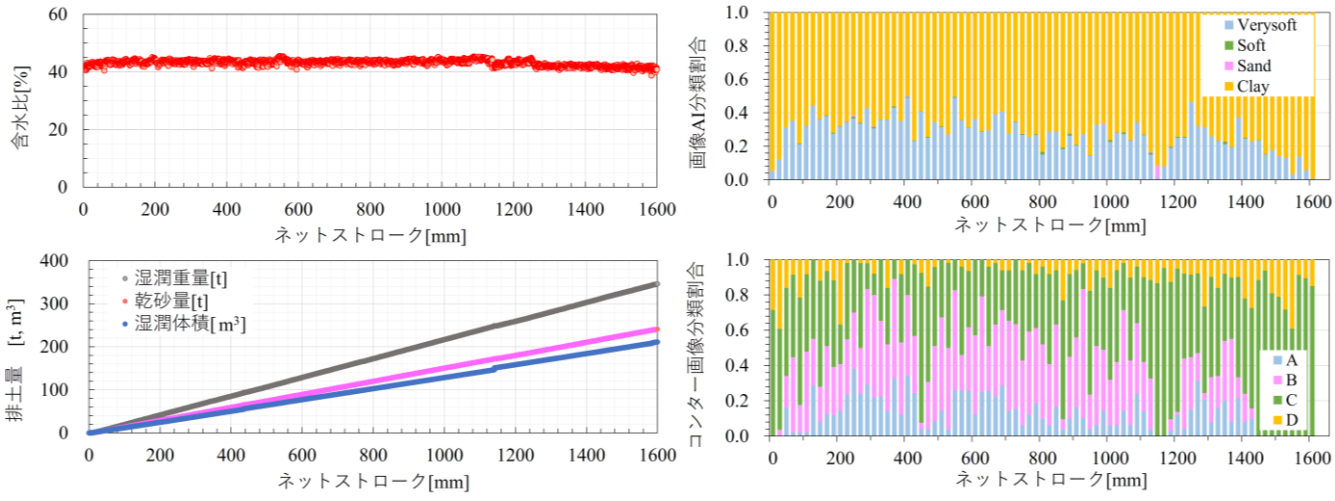


図-11 200 リング掘進中の連続計測結果

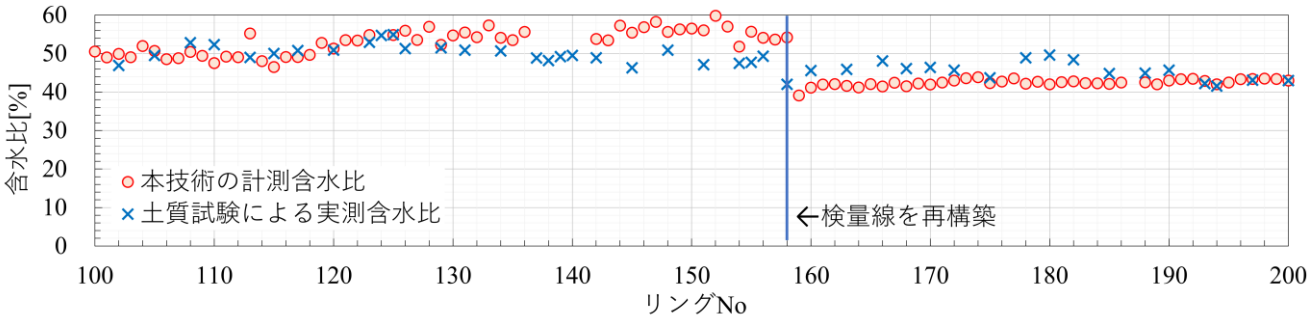


図-12 含水比計測結果（100 リング～200 リング）

図-11 の左上がハイパースペクトルカメラによる含水比，左下が排土量（土砂高さ情報測定器による体積，現場に設置済みのベルトスケールによる湿潤重量，上記含水比と湿潤重量から算出した乾砂量），右上が画像認識 AI による土砂性状分類，右下がコンター画像による土砂性状分類の結果を表している．いずれも，1 リング分のストローク 1600mm にわたり，リアルタイムに 1 秒 1 点の連続計測ができることを確認できた．

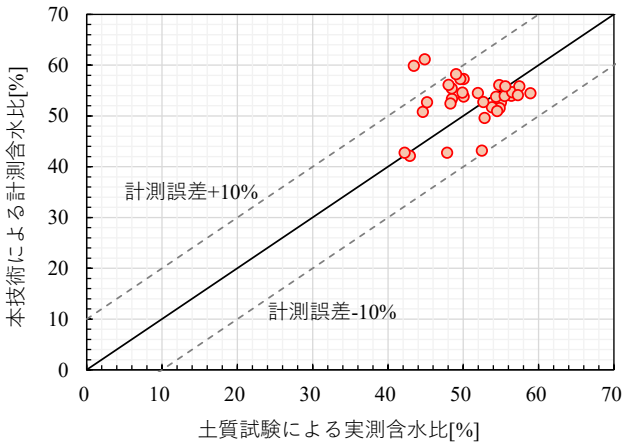


図-13 土質試験での実測含水比と本技術の計測含水比

(2) 含水比の長期計測結果

ハイパースペクトルカメラによる 100 リング～200 リングの含水比の計測結果を**図-12** に示す．本技術の計測含水比については，各リング掘進中に 1 秒 1 点間隔で計測した含水比の平均値であり，実測含水比は各リングの掘進途中に採取した土の含水比試験（JIS A1203）による含水比（複数回採取した場合はその平均値）である．ハイパースペクトルカメラの調整作業のため含水比を計測できなかった 124 リング，137 リング～141 リング，187 リングを除き長期間の連続計測ができた．

図-12 を見ると，100 リング～130 リングでは本技術の計測含水比と土質試験による実測含水比がおおむね一致していたが，130 リング～158 リングにて差がみられた．掘進に伴う土質の変化等が原因として考えられる．このため，158 リングにてハイパースペクトルカメラの検量線の再構築を行った．当該リング付近で計測含水比の変化がみられるのは検量線変更によるものである．今後も定期的に計測誤差を確認し，必要に応じて検量線を再構築する予定である．

掘進作業中は，シールドマシンオペレーターが常時確認できるモニター画面に，リアルタイムに計測した含水比を表示させた．含水比の増減傾向を添加材量調整の参考にしながら掘進を行い，安全な掘進を行うことができた．

土質試験による実測含水比と本技術による計測含水比の比較結果を**図-13** に示す．土質試験用の試料採取と同一時刻のハイパースペクトルカメラによる含水比計測結果をプロットしたものである．土質試験による実測値と本技術による計測値の差（計測誤差）は概ね 10%以内であり，平均絶対誤差（計測誤差の絶対値の平均値）は 3.9%であった．計測誤差 5%以内を目標として，引き続き計測精度の向上を図っている．

(3) 乾砂量の長期計測結果

図-14 に 100 リング～200 リングの排土量（土砂高さ情報測定器による体積，ベルトスケールによる湿潤重量，上記含水比と湿潤重量から算出した乾砂量）の計測結果を示す．計測機器類の調整作業を行った 124 リン

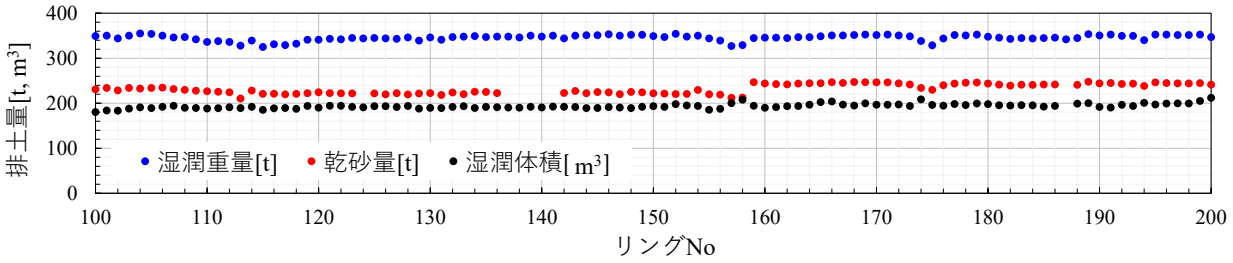


図-14 排土量の計測結果（100 リング～200 リング）

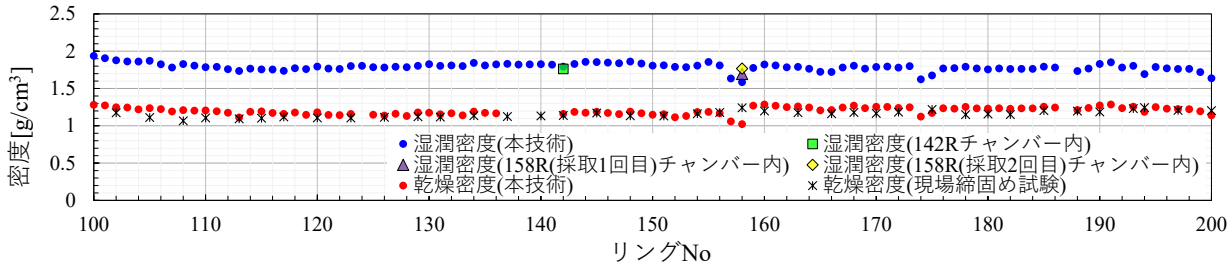


図-15 密度の計測結果（100 リング～200 リング）

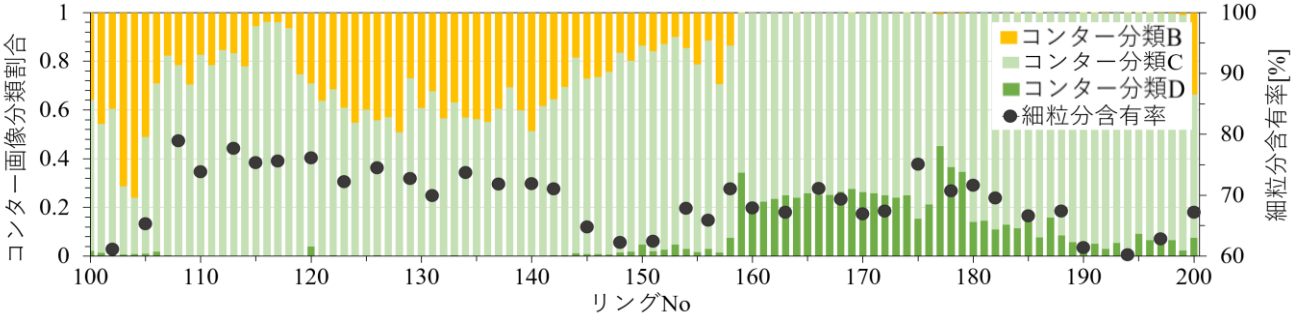


図-16 コンター画像による土砂性状の分類結果（100 リング～200 リング）

グ，137 リング～141 リング，187 リングを除くと，安定して計測ができた．実際の掘進においても，既往の排土量管理方法の妥当性検証と精度向上を図る目的で，本技術による乾砂量を確認しながら施工を行った．

図-15 に湿潤重量，乾砂量を体積で割ることで得られた湿潤密度，乾燥密度を示す．同図に，チャンバー内の土砂を採取して計測した湿潤密度[6]と，採取試料の締固め試験（JIS A1210）で得られた乾燥密度を示す．本技術で得られた湿潤密度は，チャンバー内から採取した土砂の湿潤密度と同様の値となった．また，本技術で得られた乾燥密度と締固め試験による乾燥密度は同様の傾向を示しており，本技術を用いることで掘削土砂の密度の変化を捉えられる可能性があることが示唆された．160 リング以降はわずかに湿潤密度が減少し，乾燥密度が増加する傾向がみられた．**図-8** にみられるように土砂の砂分がわずかに増加したためと考えられる．

(4) コンター画像による土砂性状分類の長期計測結果

図-16 に 100 リング～200 リングのコンター画像による土砂性状の分類結果を示す．なお，**図-16** では，細粒分含有率との比較を行うために「コンター分類 A」の流動状態に関しては除外して図化した．現場で粘土塊が出現した 155 リング付近から 178 リング付近までは，粘性が大きい粘性土が土塊状態で排土されることを想定した「コンター分類 D」の増加傾向がみられた．施工時は 173 リングから加泥材に加えて浸透剤や分散剤の添加を行った．「コンター分類 D」は 180 リング付近以降で減少しており，添加材調整の影響もあり土塊がほぐれて均一な状態になり，安全な掘進に寄与したと考えられる．

また，**図-16** に細粒分含有率を併記すると，150 リング以降で「コンター分類 D」と細粒分含有率の増減傾向に同様の傾向がみられたことから，細粒分含有率の推定にも使用できる可能性がある．

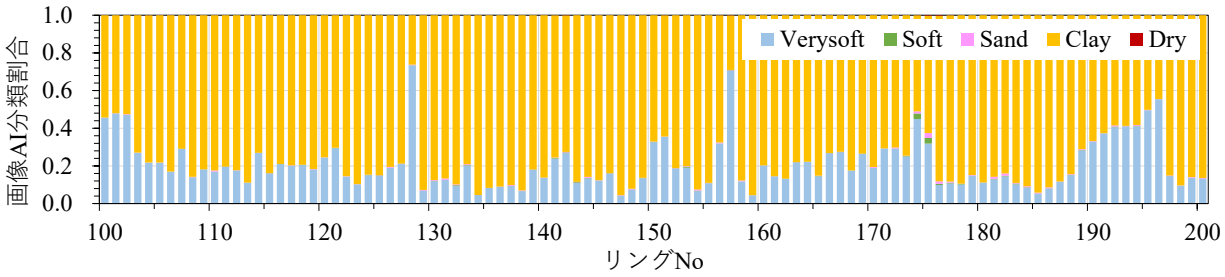


図-17 画像認識 AI による土砂性状の分類結果（100 リング～200 リング）

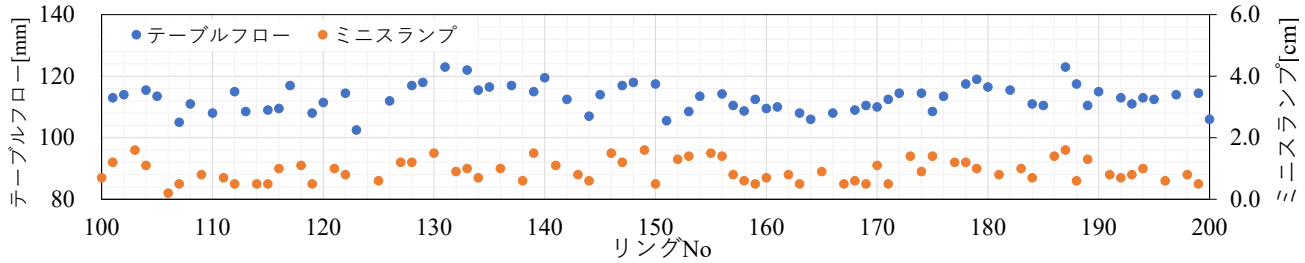


図-18 テーブルフローとミニスランプの計測結果（100 リング～200 リング）

(5) 画像認識 AI による土砂性状分類の長期計測結果



158リング土砂例　160リング土砂例

写真-7 158 リングと 160 リングの土砂の例

図-17 に 100 リング～200 リングの画像認識 AI による土砂性状分類結果を示す．計測区間においては「Clay」の分類が多く比較的安定しており，実測のミニスランプやテーブルフローの変化（**図-18**）も小さく安定した掘進が行えた．一方で，例えば 158 リング付近では他の区間と比較して分散剤や浸透剤を多く添加しており，軟弱状態を示す「Verysoft」の分類が増えていた．目視でも他リングより流動性が高い土砂が多くみられ（**写真-7**），これを反映したと考えられる．

本技術により，掘削土砂の量および性状を主観によらない同一指標で常時監視することで，掘削土砂の変化を迅速に把握できる可能性が示された．

５．まとめ

ベルトコンベヤー上を流下する掘削土砂の量および性状を連続計測可能な「掘削土評価システム」を開発し，φ12m の泥土圧シールドで計測を行った．加泥材を用いた掘進区間において，通常の管理に加えて本技術の含水比，乾砂量，土砂性状を参考にし，安定した掘進を行うことができた．引き続き気泡を用いた掘進区間でも計測を行い全線での管理を目指すとともに，地層変化による計測値への影響についても確認する予定である．

６．参考文献

1)梅原ら：シールド工事自動化技術の開発 大林インテリジェントシールド OGENTS®，土木施工，2025 年 10 月号，pp.104-107，2025

2)エバ・ジャパン株式会社 HP：https://ebajapan.jp/，2026/7/27 参照

3)板場ら：シールド掘削土の含水比連続計測技術の開発，第 60 回地盤工学研究発表会，2025

4)山田ら：土砂含水比の連続計測技術の開発，土木学会第 78 回年次学術講演会，2023

5)山崎ら：コンター画像を用いたシールド掘削土砂の連続評価技術，土木学会第 78 回年次学術講演会，2023

6)今井ら：チャンバー内土砂採取装置の現場適用実績，土木学会第 80 回年次学術講演会，2025

7)シールドトンネル施工技術検討会：シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン，https://www.mlit.go.jp/tec/content/001477789.pdf，2021