

# ICT 土工現場締固め品質管理手法「次世代 $\alpha$ システム」の開発

## ・ 国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事の実施概要 ・

前田建設工業(株) 正会員 ○石黒 健 平田昌史  
株式会社大林組 正会員 古屋 弘 稲川雄宣 松崎 晃  
フジミコンサルタント(株) 正会員 佐藤 寛

### 1. 背景および目的

道路・鉄道・フィルダム・河川堤防・宅地造成等の大型土工現場においては、各土構造物に要求される性能（締固め状態や強度・剛性・遮水性等の工学的性質）を現地確認するための現場品質管理が必ず行われる。現場品質管理手法は、近年各種計測装置の簡便化や省力化が進んでいるとはいえ、未だ相応の労力とコストを必要とする。このため、広大なエリアを対象とする大型土工現場の現場締固め品質管理は離散的な「点」の管理とならざるを得ず、またそのデータ処理は「事後」となるため施工中のリアルタイム管理を行えない。さらに、取得された品質管理データは竣工後、現場毎に発注者へ報告・提出されるものの、取得データの DB 蓄積や一元管理、維持管理など他部署を含む多様な利用者によるデータ共有・連携等の「データ活用」も実務レベルでは実現できておらず、本格的な現場管理業務の DX 化への大きな障壁（隘路）となっている。本論文で紹介する「次世代 $\alpha$ システム」は、このような現状の打破を目指す最新の ICT 土工現場締固め品質管理手法である。本システムは既往の振動ローラ加速度応答法<sup>1)</sup>を中心に、その周辺に転圧地盤の物性値を取得するための最新の ICT 計測機器をサブシステムとして配置し、土構造物の要求性能を複眼的にチェックする事で要求性能の確認及び現場土工品質管理の高度化と精緻化を目指す。さらに本格的な DX 化（現場管理業務の業務改革、および他部門・他部署との管理データ連携）を実現するためのクラウド型データ蓄積・処理システムの構築を試みている。以下では、本システムの狙いと概要を示した後、国土交通省 PRISM 大石龍門工事（滋賀県大津市）における現場実証事例を報告する。

### 2. 次世代 $\alpha$ システムが目指すもの

著者ら<sup>2)</sup>は、ICT 計器を駆使して現場土工品質管理の高度化と精緻化を目指す研究を従前より進めている。紙面の関係から詳細は文献<sup>2)</sup>に譲るが、目指す方向性は以下 3 点に集約される。

- A. 確実な現場転圧の担保：ICT 導入後も現場締固め品質管理のハードルを決して下げない事
- B. 現場土工品質管理の高度化と効率化：現場管理業務の飛躍的な生産性向上を達成する事
- C. 現場品質管理データの有効利用（性能設計や維持管理への貢献）：本格的な業務の DX 化を実現する事

図 1 に、A を達成するための基本的な考え方を示す。盛土の要求品質を確実に担保する、という観点からは、

- A-1. 転圧エネルギー（FCEL）が一定となるように現場施工を管理
- A-2. 土工材料の種類や含水比変動など現場性状の把握・区分とその記録
- A-3. 締固めの最適状態（現場で用いている重機が最大限の締固め能力を発揮している事）の担保

が必須となる。これを達成するために、次世代 $\alpha$ システムでは従来の振動ローラ加速度応答法（ $\alpha$ システム）<sup>1)</sup>に新たに 2 つの ICT 計器、3D レーザスキャナ（LS）と自走式散乱型 RI ロボットを追加、組み合わせている。

A-1 は撒き出し厚と転圧回数を一定に管理する事で達成される。現行の ICT 土工指針は既にこれを基準化しているが、締固め品質管理の観点から見れば必要条件であって十分条件ではない。次世代 $\alpha$ システムでは、LS の導入により撒き出し厚や締固め層厚をより高精度・面的・統計的に把握し、A-1 をさらに精緻化する。

A-2 は従来の透過型 RI 法による乾燥密度・含水比計測（15 点法）や材料情報の記録に相当し、次世代 $\alpha$ システムでは自走式散乱型 RI ロボットがこれを面的・統計的管理に発展させる。現時点で自走式 RI ロボットには中性子線源を搭載している（含水比計測）が、現在ガンマ線搭載ロボット（湿潤密度計測）を開発中で、2 台の

キーワード i-construction, ICT 土工, 現場品質管理, 生産性向上, DX 化, 3D スキャナ, 自走式 RI ロボット  
連絡先 〒302-0021 茨城県取手市寺田 5270 前田建設工業 ICI 総合センター TEL 0297-85-6171

自走式 RI ロボットが転圧面を自動走行する事で、従来の乾燥密度と含水比（飽和度と空気間隙率）の点管理が面管理へと変わる事になる。ロボットには画像取得機能も併設しており、転圧面の材料情報も併せ保存できる。従来の  $\alpha$  システムでは地盤剛性  $E_{roller}$  の変化を用いて材料変動を判定しようとしていたが、含水比が変動するだけでも  $E_{roller}$  が変わってしまうため、変動要因を特定する事ができなかった。次世代  $\alpha$  システムでは、自走式 RI ロボットにより取得される含水比等原因系の転圧面情報が新たに加わる事で、現場転圧状況をよりリアルに把握できるようになる。LS では撒き出し厚と転圧時沈下量から締固めによる圧縮率を面的に算出する事が可能となる。圧縮率は転圧による密度増加率に対応する指標となるため、自走式 RI ロボットによる乾燥密度の値と併せ、締固めによる転圧面の密度増加やその面的分布（転圧不均一性）を精緻に捉える事が可能となる。

A-3 では、現場締固めに用いている転圧機械と材料、撒き出し厚の組合せにおいて達成しうる最適状態（これ以上は締固まらない、空気間隙が減らない状態）に到達している事を現地確認する。従来管理では試験施工時のレベル沈下量の取れんや  $D_s$  管理、透過型 RI 法による空気間隙率 ( $v_a$ ) 管理がこれに相当する。次世代  $\alpha$  システムでは、振動ローラ加速度応答値 ( $E_{roller}$ ) の取れんに加え、LS による転圧取れん確認（試験盛土）と自走式 RI ロボットによる転圧面  $v_a$ （飽和度）の面的計測が、より緻密かつ面的な転圧取れん管理を可能とする。

以上、次世代  $\alpha$  システムでは、 $\alpha$  システム（地盤剛性）、3D レーザスキャナ（撒き出し・締固め層厚と転圧時沈下・圧縮率）、自走式 RI ロボット（乾燥密度と含水比）の 3 種類の ICT 機器が転圧地盤の品質を高精度・面的に取得するだけでなく、これら情報間の相互補完によって現場品質管理を結果系から原因系に発展させる事が可能となる。これにより、 $\alpha$  システムが志向してきた面的管理手法（図-1 中の M3 法<sup>3)</sup>）すなわち加速度応答値の最弱部（低剛性部）の抽出に関しても、高含水比・低乾燥密度・低圧縮率といった多面的な転圧情報が紐づけられ、現場の転圧状況の把握や施工法の最適化が可能となる。表-1 に、次世代  $\alpha$  システムの上記 3 つのコンポーネントがもたらす転圧面情報や 3 者が織りなす相乗効果を整理した。なお、LS と自走式 RI ロボットは振動ローラ以外の無振動転圧機械や狭隙部用小型転圧機械等により転圧された地盤にも適用可能であり、次世代  $\alpha$  システムは、もはや振動ローラの使用を前提とはしていない。表中の空白部分、転圧中のリアルタイム沈下量計測は今後の課題であり、重機側での自動計測手法等を今後試行していく。

B. の生産性向上に関しては、説明は不要であろう。ICT 機器の導入は、従来の離散的な点管理、事後確認、相応の労力とコストといった幾つかの現場課題を解決する。2021 年度および 2022 年度の国土交通省 PRISM 実証工事では、これら ICT 機器の導入により、従来手法よりも低コストで 100 倍～1000 倍の多点的・統計的データを取得できる事を確認済である。C. のデータの保管と有効活用についても、後述するクラウド型データ処理システムにより現場品質管理業務の本格的な DX 化（業務改革とデータの利活用）が可能となる。

### 3. 次世代 $\alpha$ システムの概要

次世代  $\alpha$  システムの 3 つの構成要素（ICT 機器）と、取得データを統合するクラウドシステムの概要を図-2 に示す。各 ICT 機器およびクラウドシステムの詳細と特長を図中に併記した。ICT 機器とクラウドシステムについては論文<sup>4)5)</sup>にて詳述しているので参照されたい。

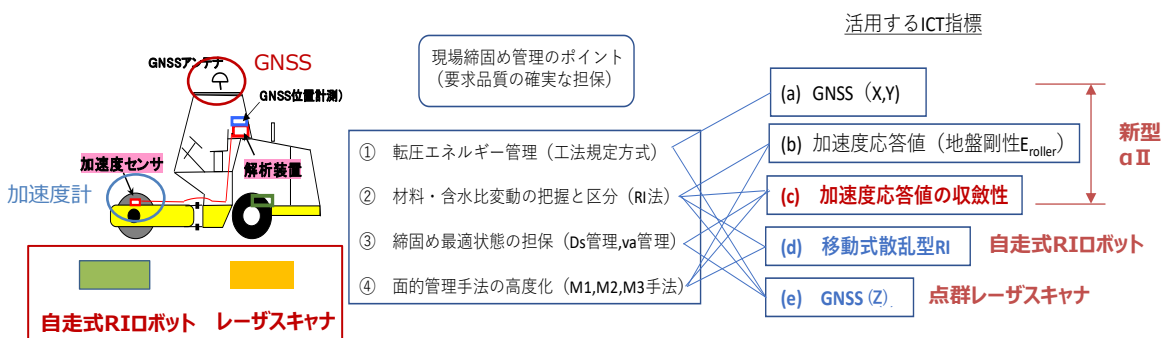
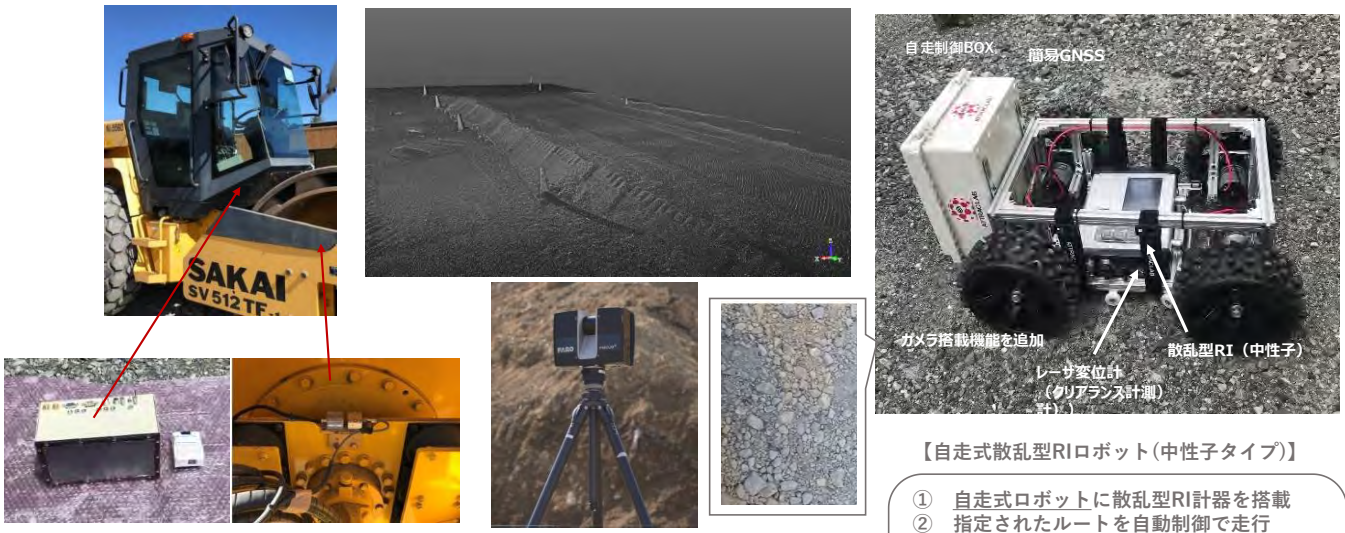


図-1 次世代  $\alpha$  システムが目指すもの

表-1 次世代αシステムの3つのコンポーネントとその役割及び相互補完

	ICT情報取得の目的	新型αシステム	3Dレーザスキャナ*	自走式散乱型RIロボット（中性子型・γ線型）*	従来手法（レベル測量・透過型RI）
試験施工	撒き出し厚の決定	○乱れ率による定量的判断	○点群データによる転圧収れん・圧縮率の高精度・統計的判断	○面的データによる面的・統計的判断	△（離散的点情報）
	転圧回数決定				
本施工（転圧中リアルタイム監視）	転圧回数の監視	○転圧回数管理システムによるオペ側リアルタイム確認			○転圧回数管理システムによるオペ確認
	転圧収れんの監視	○乱れ率による定量的確認			
	過転圧の監視	○乱れ率の低下をリアルタイム監視			
	材料変動の監視	○乱れ率変動により定量的かつ場所特定確認			
	転圧の均一性監視	○E <sub>roller</sub> による相対的弱部抽出			
施工（品質）管理（転圧後）	撒き出し・締固め層厚の現地確認		○点群データによる高精度・統計的把握		
	転圧均一性の面的確認	○E <sub>roller</sub> 分布による判定	○圧縮率による判定（弱部の原因）	○密度・含水比分布（弱部の原因）	
	密度・含水比分布の確認	△乱れ率による間接推定	△圧縮率による間接的推定	○密度・含水比分布の直接把握	△（離散的点情報）
	地盤剛性情報の取得	○E <sub>roller</sub> 分布による判定			



- 【自走式散乱型RIロボット(中性子タイプ)】
- ① 自走式ロボットに散乱型RI計器を搭載
  - ② 指定されたルートを自動制御で走行
  - ③ 簡易GNSSを搭載し、含水比を面的に計測
  - ④ カメラを搭載し、画像解析により材料判別
  - ⑤ ガンマ線（密度計測）搭載ロボット開発中  
⇒タイヤローラ等の静的・小型締固め機械での転圧地盤の現場品質管理にも対応可能

- 【新型αシステム】
- ① 最新のOSを搭載（高機能・高精度化）
  - ② 安価なGNSSを内蔵（コストダウン）
  - ③ コンパクト化と耐久性向上

- 【点群レーザスキャナ】
- ① 市販・レンタル品を選択可能
  - ② 撒き出し前後と転圧中に計測
  - ③ 撒き出し厚の面的把握
  - ④ 転圧による沈下収斂の確認
  - ⑤ 転圧による圧縮率（締固め度）の面的把握

- 【クラウドシステムの開発】
- ① 取得データをクラウドDB保存
  - ② 本格的なDX化(業務改革)に対応
  - ③ 他部署・他分野とのデータ連携

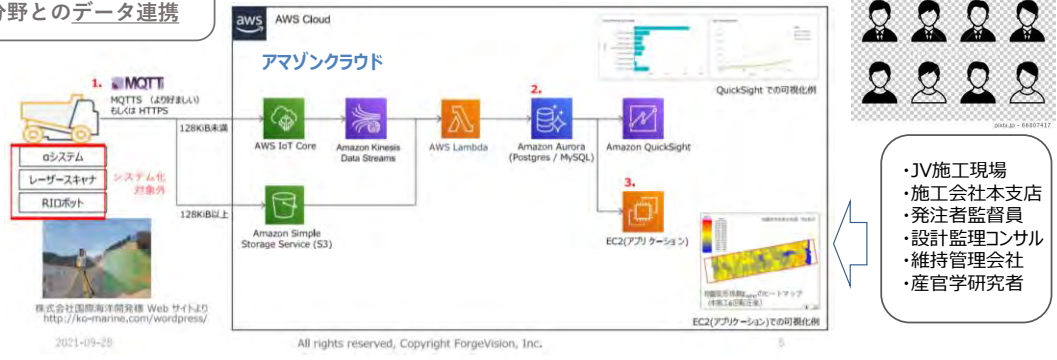


図-2 次世代αシステムの3つのコンポーネントとクラウドデータ処理システムの概要

#### 4. 国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事の実施概要

次世代 $\alpha$ システム 2022 年度国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事は、図-3(a)に示す新名神高速道路大石龍門建設工事（大津サービスエリア予定地）において実施された。図(b)～(d)は、各々 $\alpha$ システムによる転圧地盤剛性のリアルタイム管理、3D レーザスキャナによる転圧面の点群データ取得、自走式散乱型 RI ロボットの転圧面走行状況を示す。実証工事では約 1000m<sup>2</sup> の本施工エリアで次世代 $\alpha$ システムによるデータ取得が実施された（材料は細粒分混り土の路体材料。転圧機種は 10t 級振動ローラ。撒き出し厚 30cm）。盛土材料の材料特性や本施工前に実施した事前試験盛土の結果については、別途文献<sup>6)</sup>にて詳述しているので参照されたい。

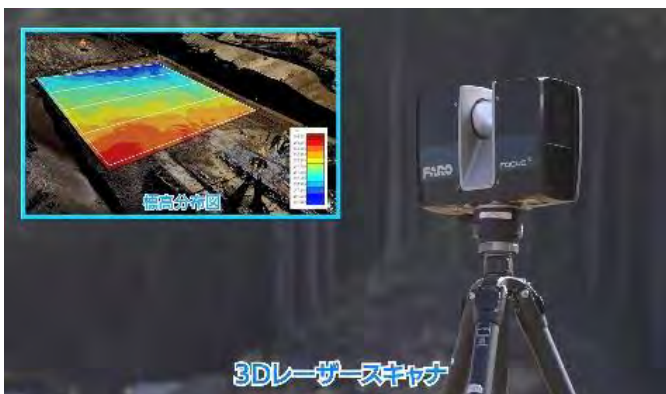
図-4 には、次世代 $\alpha$ システムの 3つのコンポーネント（ICT 機器）で取得された転圧面物性値の面的分布（ヒートマップ）の例を示す。(a)は $\alpha$ システムによる乱れ率（地盤剛性）の取得結果である。図-3(a)に示すように、本施工エリアは 2つの尾根を切土し、その上に路体材料が盛立てられた。このため、切土部の上に盛土が薄層で盛り立てられている領域では、 $\alpha$ システムの地盤剛性は基盤の影響を受けて高く（黄色）、影響の少ない盛土層厚が厚いエリアは低く（青色）検出されている。土の締固め効果は基盤剛性の影響を受けるため、(d)の LS による圧縮率もまた、その近傍で大となっている事は興味深い。紙面の関係から省略する<sup>6)</sup>が、基盤層の影響を受けないエリアでは転圧回数の増加と共に乱れ率が一旦増加し、6 回以降は減少する過転圧現象を捉えており、 $\alpha$ システムが最適転圧状態のリアルタイム監視に利用可能であることも確認されている。(b)は自走式散乱型 RI ロボットにより計測された含水比分布である。本施工は 4 日間に渡って行われ、土取場が微妙に変化した。その影響もあり本施工ヤードの中心部には相対的に含水比の高い領域が混在している事が分かる。自走式ロボットの面的計測は実はもう 1 回行われたが、その時の含水比は約 4% 図よりも低かった。気象庁のデータによると 2 回目の計測を行った週、本地点は 1 回目比べて日照時間が長く、また風速も大であった。これによる転圧面表層の乾



(a) 施工エリア全景



(b)  $\alpha$ システムによるリアルタイム管理



(c) 3D レーザスキャナによる点群データ取得



(d) 自走式散乱型 RI ロボットの転圧面走行状況

図-3 国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事の実施状況

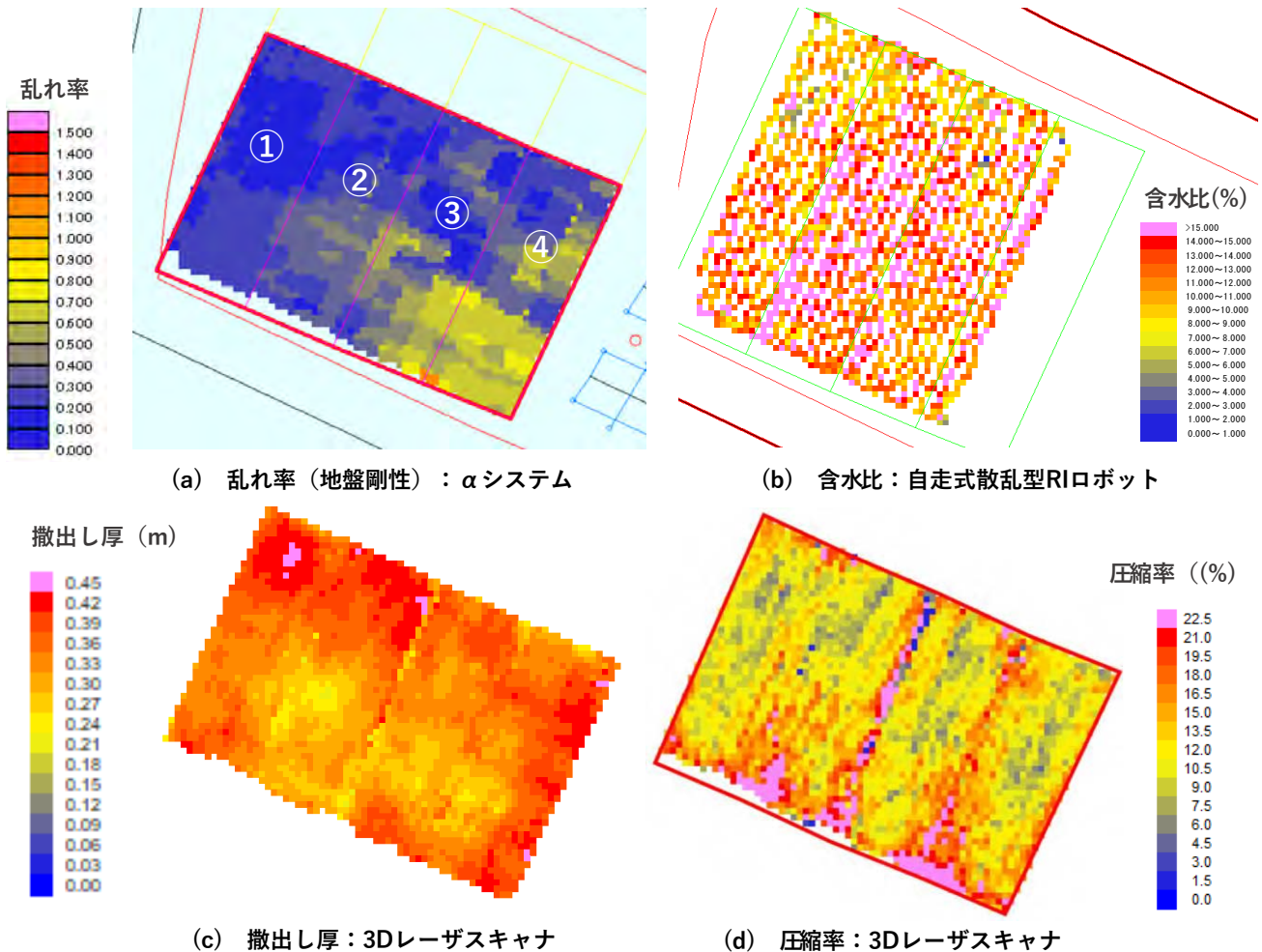
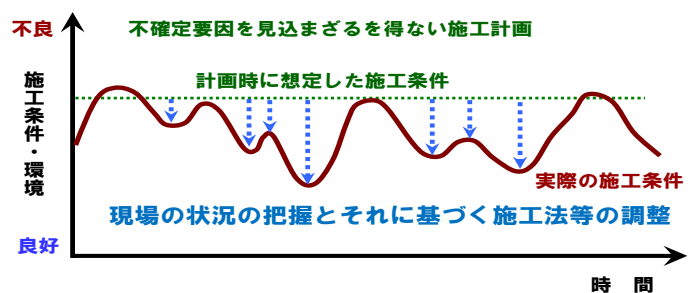


図-4 次世代 $\alpha$ システムにより取得された本施工転圧面の各種物性値のヒートマップ

燥の履歴を、自走式 RI ロボットは正確にキャッチしていた。(c)は 3D レーザスキャナによる撒き出し厚の分布、(d)は同じく 3D スキャナで計測された転圧後沈下量を撒き出し厚で除して求めた圧縮率のヒートマップである。簡易トンボを用いて撒き出した事もあり、撒き出し厚は必ずしも均一ではなく、レーザスキャナはこれを mm 単位の精度で炙り出している。(d)の圧縮率のヒートマップからは、前述した切土基盤付近で値が大となる他、施工レーン境界 ((a)中の①→④の順番に施工が行われた) でのラップ施工による高圧縮率部も確認でき、現場施工状況をこれら物性値によって定量的かつ面的に可視化する事が可能となっている。

このような現場の材料変動、施工条件、施工結果の可視化がもたらすものは何か。図-5 は建山<sup>7)</sup>による提案例である。工事計画時に想定した施工条件は実際の現場のそれとは必ずしも一致しない。図-4 に示すような現場状況の把握がほぼリアルタイムに可能となれば、実情に基づく施工法等の調整を行い、過剰なエネルギー、資材、労働力を削減する事で現場の生産性向上を図る事が可能となる。もちろん、このような可視化が、同時に現場リスクの合理化や締固め品質の担保を担うであろう事は言を俟たない。

次世代 $\alpha$ システムが現場品質管理にもたらす効能を、あと 2 つ挙げておきたい。一つは品質管理データの統計的取扱いであり、もう一つは取得情報同士の相関性分析による現場施工事象のより深い理解である (実は、これがなければ、おそらく図-5 は達成できない)。



現場の状況に応じた柔軟な対応  
 過剰なエネルギー、資材、労働力の削減

図-5 精緻な現場マネジメントによる現場の生産性向上<sup>7)</sup>

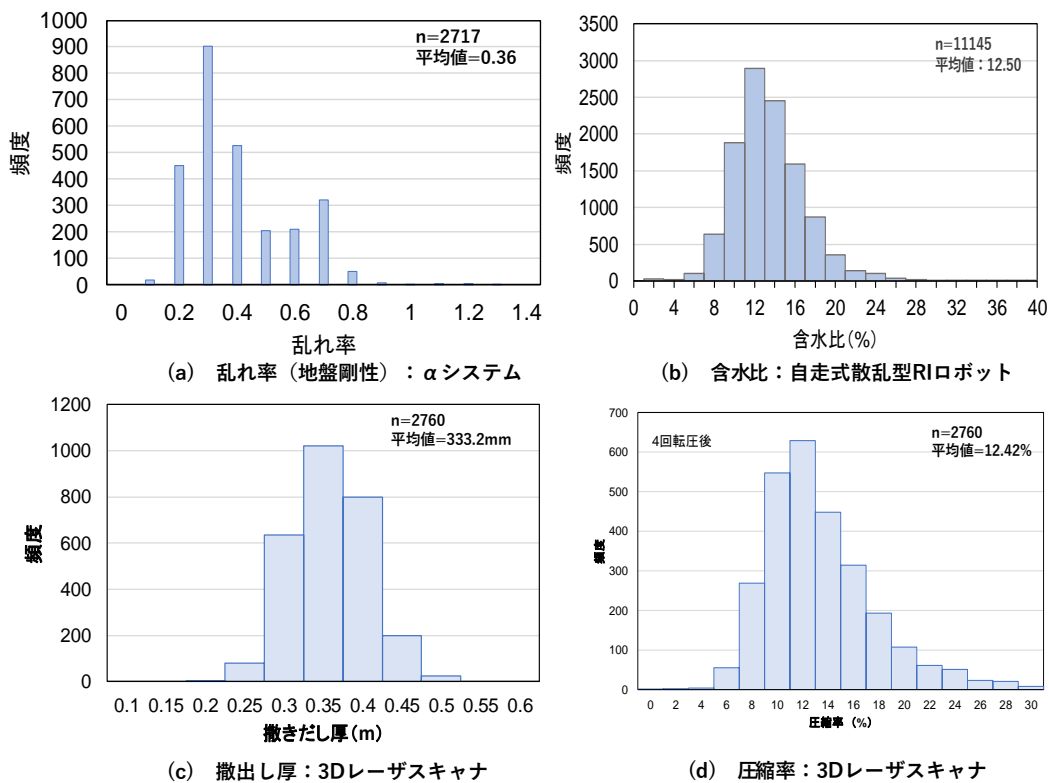


図-6 次世代αシステムにより取得された本施工転圧面の各種物性値のヒストグラム

図-6に、図-4の各種物性値ヒートマップに対応するヒストグラムを示す。従来離散的な点の管理となっていたこれら諸物性が、データ数にして数千から1万といった統計量として取得され、データのばらつきを含めた統計的なデータ処理が始めて可能となる。αシステムでは、面的に取得された地盤剛性値に対し、統計的な取り扱いや目標値に対する許容不良率の議論がしばしば行われてきた<sup>3)</sup>が、図のような現場転圧面の多点品質データを得ることで、加速度応答値のみならず、自走式RIロボットで取得された乾燥密度、含水比や3Dレーザスキャナで計測された圧縮率等を併せ利用しながら、より精緻な議論が可能になるものと思われる。

図-7は、次世代αシステムの3つのICT機器で取得された現場転圧面データ相互の相関性分析結果である。(a)は自走式RIロボット(含水比)とαシステム(地盤剛性)の関係を示す。図-4(a)中に①~④と記したように、本施工は4つの施工ブロック別々に実施された。(a)を見ると、横軸の含水比の範囲には大差がないように見えるが、明らかにヤード毎に縦軸の地盤剛性は異なっている。ヤード平均で整理した(b)で、やっとその姿が見えてくる(多点データの平均化が奏功)。前述したように、本地点の基盤形状(切土)と盛土層厚の影響により、αシステムで取得される地盤剛性(10t級振動ローラでは深度60cm付近までの地盤剛性を拾う)はヤード①→④に向けて増大する。図は、取得された地盤剛性の違いの原因が施工含水比以外にある事を説明する。本実証工事では、細粒分を含む路体材料の他に、同じ現場内で採取した粗粒材料(頁岩)の試験施工も併せ実施された<sup>6)</sup>。(c)はその結果を赤で併記したものである。データは大きく2群に分かれており、このような相関分析を時系列的に行う事で、現場で生じている材料変動を補足する事が可能と考えられる。(d)はRIロボットの含水比と3Dスキャナの圧縮率の関係を示す。この全点プロットからは明確な分析は難しいが、ここでも(e)の平均化が奏功する。各ヤード毎の平均値で見ると含水比の低いヤード②は含水比の高い他ヤードよりも圧縮率が大きく、撒き出し後の飽和度が低いほど(圧縮可能な空気間隙量が多い程)圧縮率が大きくなる事を示唆している。(f)は(c)と同じく、材料変動をこの両軸からも捕捉可能であることを物語っている。最後の(g)は3Dスキャナによる圧縮率とαシステムによる地盤剛性の関係である。ヤード①、②とヤード③、④で傾向が異なる事は、(h)の平均値プロットで明瞭に確認できる。転圧による圧縮率は基盤剛性の影響を受ける(サンドイッチ効果)と言われているが、図に示すように撒き出し層の圧縮率は基盤剛性を受けて変化し、切土部の影響が強い①、②と弱い③、④で異なる2本の関係が得られている。最後の(i)はやはり材料変動の可視化に使いそうである。今回の粗

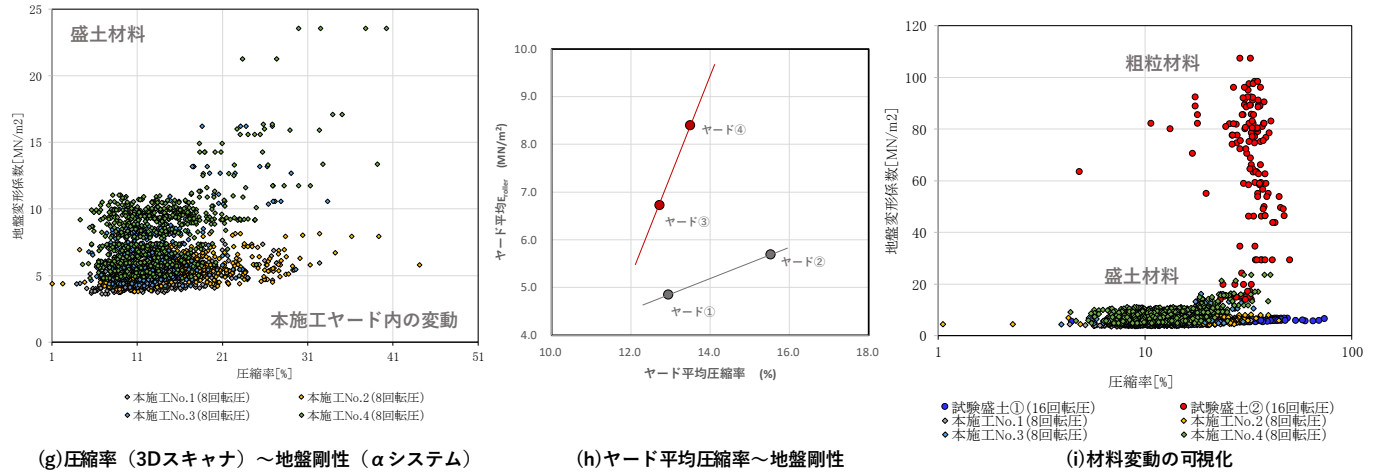
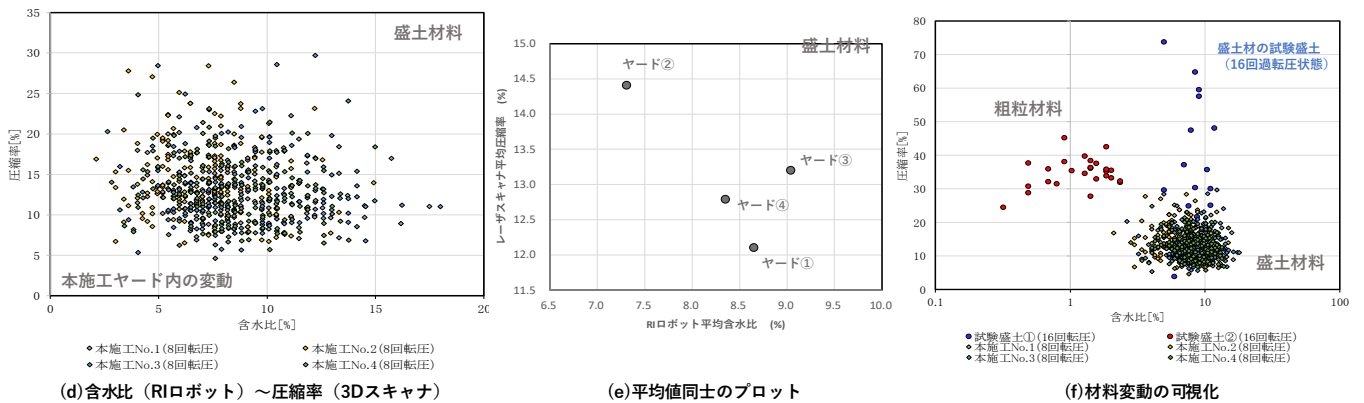
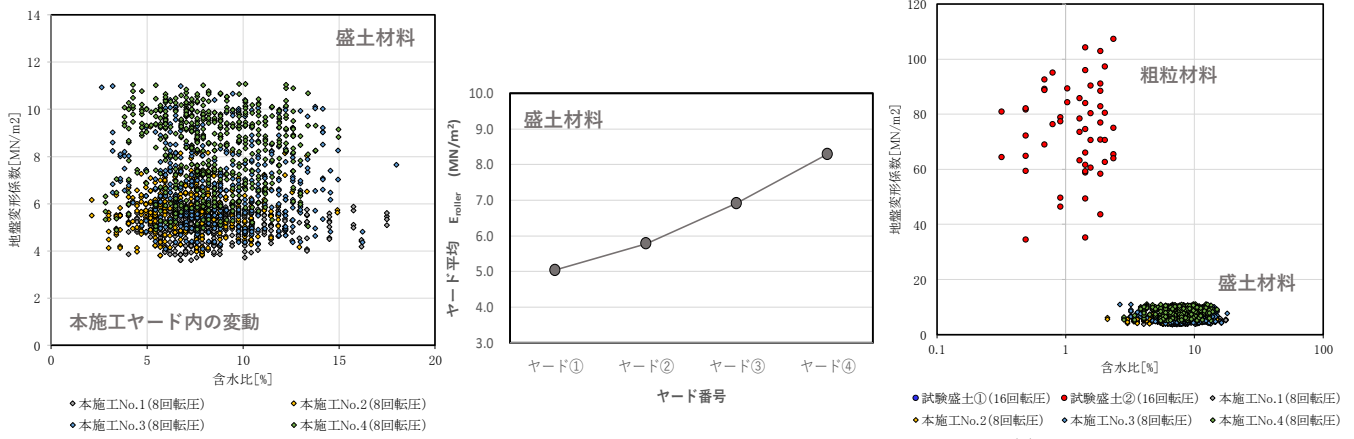


図-7 次世代 $\alpha$ システムにより取得された本施工転圧面の各種物性値同士の相関関係

粒材料（頁岩）は転圧による剛性増加と同時に粒子破砕が生じやすい材料であり、細粒分を含む路体材料とはその転圧特性が大きく異なる事が図より見て取れる（現場事象の可視化）。

以上、次世代 $\alpha$ システムのデータ処理・分析機能を用いる事で、従来の離散的な点の管理では不可能であった様々な分析を施工ヤード（施工日）別に行ったり、材料変動の様子をリアルタイムに可視化、把握する事などが可能になるものと思われる。図-4、図-6、図-7 に示したヒートマップ出力、統計分析、相関性分析（割愛したが、転圧収れん分析も可能）は、図-8 に示すクラウドデータ処理システム上から、WEB 環境で実施可能である。本環境はユーザーID とパスワードを付与されたユーザーであれば、誰でも遠隔から操作可能である。図中に示したように、操作はプルダウン機能によって所定の分析機能、対象転圧データ、転圧回数等を選択、画面出力し、ユーザーライクかつ編集可能な結果ファイルとしてダウンロード可能となっている。

最後に余談を一つ。図-9 は自走式散乱型 RI ロボットに取り付けたカメラにより取得した画像データとその画像解析例を示している（大石龍門工事とは別地点で取得）。均一材料、混合材料、高含水比ゾーン混りの3者

で撮影を行い比較を試みた。取得画像の RGB を色相と明度に変換すると、材料混合は色相の変化により、含水比変動は明度の変化により抽出できそうである。転圧面情報は、次層の撒き出しが終わると再びそれを見る事はできなくなる。転圧面の画像をクラウド側に送信・保存し、次世代  $\alpha$  システムの各取得物性と紐づけてこれを残しておくことで、例えば維持管理段階で支障が生じた部位の施工時品質と同時に、「その土の面構え」を後々確認する事ができる。その材料の室内試験結果なども一緒に DB に保存、共有しておけば、本格的な DX 化、すなわち他部門他部署連携が実現できるのではないかと考えている。

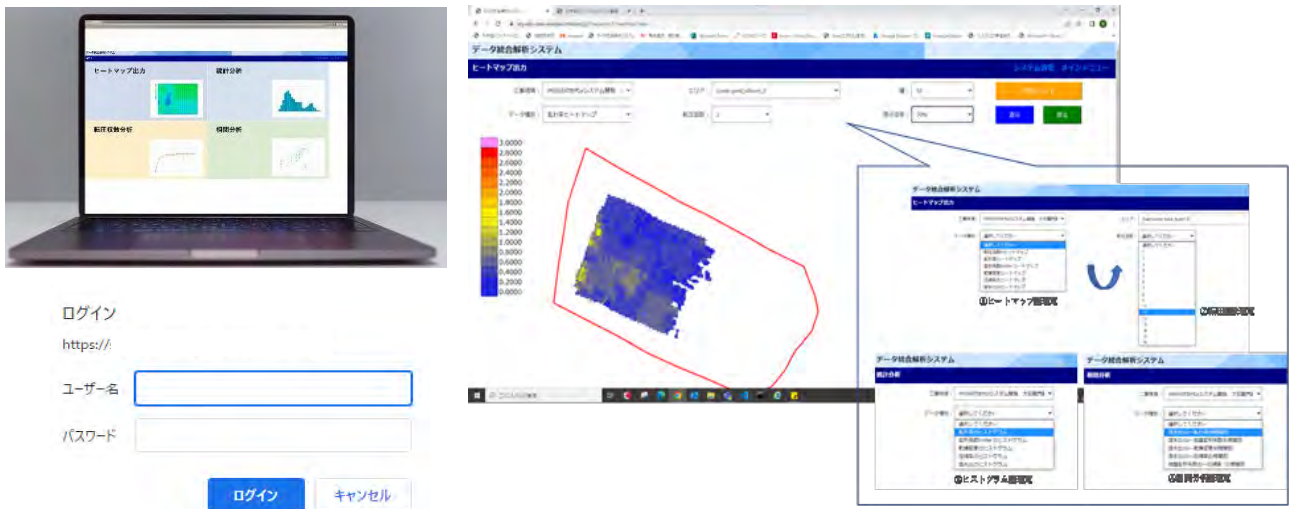


図-8 次世代  $\alpha$  システムのクラウドデータ処理システムのログイン及び操作画面

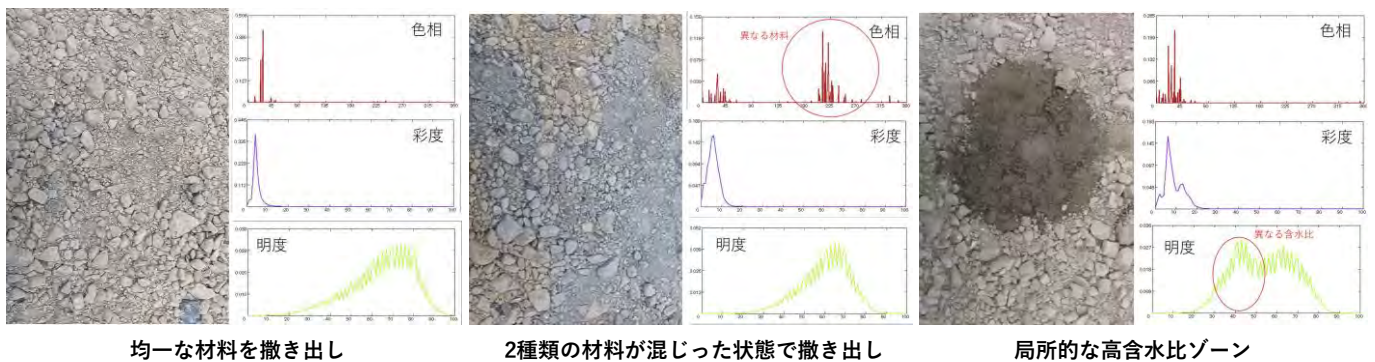


図-9 自走式散乱型 RI ロボットで取得した転圧面画像の画像解析例

【参考文献】

1) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集 No.652III-51,115-123, 2000. 2) 石黒 健・古屋 弘・内山恵一・池永太一・安部哲生・日下寛彦・中島康介・中村洋丈: 振動ローラ加速度応答法を用いた新しい ICT 土工品質管理手法の提案, 2020 年度土木建設技術発表会 (土木学会) 3) 古屋 弘: 振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの施工事例, 基礎工 Vol. 48, No. 11, pp. 84-87, 2020. 4) 稲川雄宣・古屋 弘・松崎 晃・石黒 健・平田昌史: 次世代  $\alpha$  システムの開発 (その 1) -新しい盛土品質管理築手法の構築-, 2022 年度 i-construction シンポジウム. 5) 松崎 晃・古屋 弘・稲川雄宣・石黒 健・平田昌史: 次世代  $\alpha$  システムの開発 (その 2) -自走式散乱型 RI ロボットの開発-, 2022 年度 i-construction シンポジウム. 6) 石黒 健・平田昌史・古屋 弘・稲川雄宣・松崎 晃・佐藤寛: ICT 土工締固め品質管理「次世代  $\alpha$  システムの開発」-国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事における試行事例-, 土の締固め合理化シンポジウム (2020) 投稿中. 7) 建山和由: 土木学会建設用ロボット委員会 振動ローラの振動計測による締固め施工管理手法の確立に向けた研究ワーキンググループ-振動締固めに関する研究 WG- WG 活動報告書, 第 7 章 まとめと今後の展望, 令和 4 年 1 月.