

# 新しい締固め品質管理システムの開発

松崎 晃 稲川 雄宣  
古屋 弘

## Development of Advanced Compaction Quality Control System

Ko Matsuzaki Yusen Inagawa  
Hiroshi Furuya

### Abstract

An advanced compaction quality control system was developed to improve productivity and achieve breakthroughs in the compaction quality control of on-site earthworks. However, the measurement accuracy of the self-propelled nuclear gauges robot, which is one of the components of the system, could decrease depending on the distance between compacted ground surface and measuring instrument. Therefore, a series of laboratory experiments was conducted to examine the effects of distance on measurement accuracy. Additionally, it was confirmed that advanced soil quality control is possible by implementing a new system through on-site demonstration experiments and visualization using a data integration analysis system.

### 概要

盛土工事における効率的かつ面的な締固め品質管理を目的として、筆者らは新しい締固め品質管理システムを開発している。その構成要素の一つである自走式散乱型RIは、締固め品質管理の重要な確認項目である含水比を面的に計測することができる。一方で、散乱型RI計測器底面と計測対象地盤の離隔や走行速度の影響などによる計測精度の低下が課題であった。そこで計測精度の向上を図るために、散乱型RI搭載部の仕様検討および室内実験を実施し、搭載部の機構と離隔による補正方法を決定した。また、現場実証実験で新しい締固め品質管理システムの構成要素であるαシステム、3Dレーザースキャナ、自走式散乱型RIの計測を行った。さらにデータ統合解析システムで可視化を行うことで、複合的な観点から盛土の締固め品質評価を行うことができた。開発したシステムにより、施工領域全体の性状を多面的に把握することによる高度な品質担保を実現した。

## 1. はじめに

一般に道路・鉄道やダム等の盛土工事における締固めでは、各構造物に要求される性能を現場試験により担保している。現場品質管理手法は、近年、計測装置の進化とともに徐々に省力化されているが、未だに多大な労力を要している。またその管理単位と頻度は、例えば1000m<sup>3</sup>に1回といった、離散的な管理にならざるを得ないことに加え、そのデータは事後処理が必要でありリアルタイムに施工品質を管理できない。そこで、筆者らは2001年に、加速度応答法を用いた締固め管理システム「αシステム」を開発した<sup>2)</sup>。

一方で、品質管理データは竣工後、現場ごとに発注者へ納品されるが、データの蓄積や一元管理、様々な利用者による共有・連携等のデータ活用も実務レベルでは進んでおらず未だDX(Digital Transformation)の障壁となっている。

以上を背景に、締固め品質管理の更なる高度化を目的としてαシステムに複数の計器のデータを加え、複合的に品質管理を行う新しい締固め品質管理システム(以下、

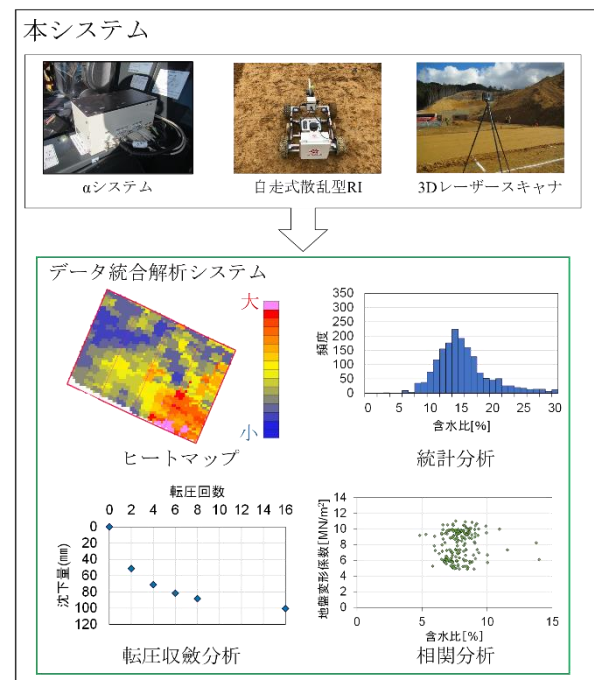


Fig. 1 本システムの構成  
Components of the System

本システムと称す)を開発している。

本システムは、Fig. 1に示す $\alpha$ システム<sup>2)~5)</sup>、散乱型RI(Radio Isotope)水分計を搭載した自動走行ロボット(以下、自走式散乱型RIと称す)、3Dレーザースキャナ、データ統合解析システムで構成される。データ統合解析システムは各種計測器から取得された情報を集積し、データベースに格納すると共に、地盤変形係数、含水比、乾燥密度等の地盤物性を推定し、ヒートマップや相関図等による可視化を行うことができる。これらを活用することで複合的な観点からの盛土品質評価が可能となる。また $\alpha$ システムは振動ローラへ車載して計測を行い、自走式散乱型RIは自動走行による計測、3Dレーザースキャナも施工エリア外から計測を行うことができるため、転圧中に重機と人が交錯することは無く安全に計測を行うことができる。

以上のように、盛土締固め品質管理の高度化および省力化・無人化を含むDX化を本システムにより行うことで、現場の生産性向上のみならず、施工領域全体の性状を多面的に把握することにより、高度な品質担保を実現できる。

本システムは官民研究開発投資拡大プログラム(以下PRISMと称す)での試行業務に採択され、実現場において実証実験を実施した。本稿では、本システムの構築にあたっての精度検証およびPRISM実証実験での成果について述べる。

## 2. 本システムの構成

### 2.1 $\alpha$ システム

$\alpha$ システムは振動ローラの加速度応答を利用した地盤剛性評価手法の一つである。Fig. 2(a)に示すように、転圧が進行すると振動輪の加速度波形が変化する。この波形を高速フーリエ変換した結果をFig. 2(b)に示す。転圧が進行すると、1/2分数調波スペクトルが卓越することが分かる。この周波数特性値と振動ローラをFig. 3のように2質点にモデル化することで地盤変形係数 $E_{roller}$ を推定することができる。 $\alpha$ システムはこれらを利用し、振動ローラの加速度応答からを直ちに地盤変形係数 $E_{roller}$ を出力する<sup>6)</sup>。

GNSS(Global Navigation Satellite System)を用いた転圧管理システムと組み合わせることで、工法規定による管理だけでなく品質を施工面全面で把握することが可能である。さらに締固めを行いながらリアルタイムかつ施工面全体にわたって地盤品質を判定するため、従来の平板載荷試験やRI計器を用いた計測方法に比べ、効率的に盛土の締固め品質管理を行えるとともに、施工域全体の品質を記録し評価することが可能となる。

現行の $\alpha$ システムは従来型からOS、CPUのアップデートを行っており、0.5秒間で1024個のデータをサンプリングし、高速フーリエ変換を行って分析することで高密度な分析が可能である。振動ローラの走行速度はほぼ時速

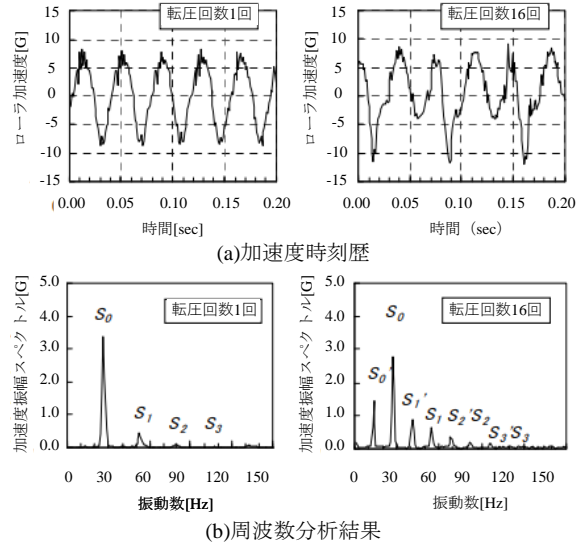


Fig. 2 加速度応答法の概要

### Overview of Acceleration Response System

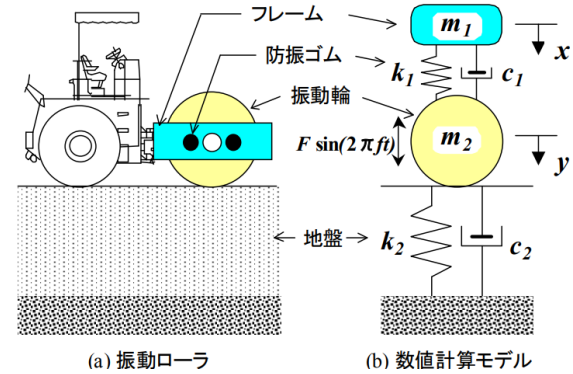


Fig. 3 振動ローラおよび地盤のモデル化  
Simulation Model for the Roller and Ground

### 自走式散乱型RI

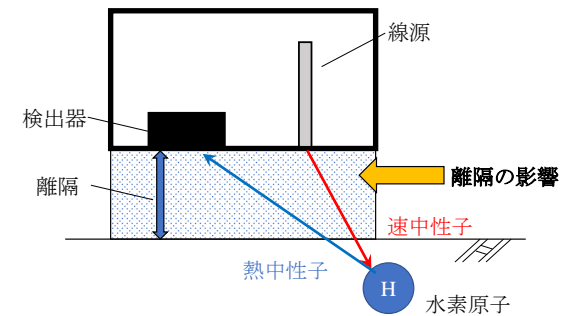


Fig. 4 散乱型RI水分計の計測原理  
Principle of Nuclear Gauges

4km(毎秒約1m)であるため、0.5秒間隔の分析によって、結果が国土交通省やNEXCOで管理の単位とされている50cmメッシュごとに出力される。さらに、内部に2周波のGNSSモジュールを内蔵することで平面位置情報の記録機能を追加した。これにより転圧回数の管理、転圧軌跡の管理、地盤剛性の評価等が全てオールインワンで実施可能となった。

GNSSはVRS(Virtual Reference Station)を用いて補正情報を受けるRTK(Real Time Kinematic)方式を採用してい

るため、平面位置情報の精度は±2cmと非常に高い。

## 2.2 自走式散乱型RI

散乱型RIは地盤に置くだけで含水比や密度を計測できるRI計器である。地盤の含水比を計測する散乱型RI水分計の計測原理をFig. 4に示す。線源から出るエネルギーが比較的高い速中性子は、水素原子に衝突しエネルギーを失うことで熱中性子に変化する。散乱型RI水分計はこの熱中性子をカウントする計測器である。熱中性子の計数率を標準計数率で除した値は計数率比と呼ばれ、計数率比を式(1)に代入することで含水比を算出できる(詳細は文献7)を参照)。一般的に散乱型RI水分計の深度方向の測定範囲は、10cm~15cm程度である<sup>8)</sup>。

$$W = \frac{n \sqrt{B(C-R_m)}}{\sqrt{R_m - A - C}} \quad (1)$$

$w$  : 含水比  
 $R_m$  : 計数率比  
 $A, B, C, n$  : 校正定数

筆者らは面的な含水比計測を目的に、散乱型RIを自走ロボットに搭載した自走式散乱型RIを開発している<sup>9)</sup>。自走式散乱型RIの開発にあたっては、地盤と計測器底面の間に離隔が生まれるため散乱型RIの計測結果をそのまま使うことができない。散乱型RIのうち、含水比を計測する散乱型RIを自走ロボットに搭載する際の課題に対して検討した結果を3章で詳述する。

自走式散乱型RIは $\alpha$ システムと同様のGNSSを搭載しており、汎用自動操縦用アプリケーションを利用することで自動かつ面的に計測が可能である。またデータ統合解析システムと連携し、含水比の面的な分布を把握することで局所的な弱部を検出することができる。

## 2.3 3Dレーザースキャナ

3Dレーザースキャナは、計測部を回転させながら全周にわたってレーザーを照射することで周囲の形状を捉え、点群と呼ばれるデータを取得する機器である。点群は3次元的な座標を保持している。その利用用途は広範囲におよび、ICT土工においても利用が拡大している。

NEXCO土工管理要領<sup>10)</sup>では、モデル施工で沈下量の収斂傾向を確認することが定められている。モデル施工では通常、レベルにより沈下計測を行うが、本システムでは施工中に3Dレーザースキャナで施工面標高の計測を行うことで、簡易かつ面的に沈下計測を行うことができる。

得られた点群データをデータ統合解析システムと連携させることで、沈下の収斂傾向や面的な沈下量の分布を可視化することができる。3Dレーザースキャナを用いて、撤出し前、撤出し後、転圧回数ごとに施工面を連続計測し、前述した $\alpha$ システムと同一のメッシュ内の点群標高の平均値から転圧面の沈下量を抽出することで、施工面

の沈下量を追跡することを可能にした。これにより加速度応答の指標(地盤変形係数)に沈下量の収斂性を加えて品質管理を行うことができる。また、点群の標高データを用いて以下の4点の評価が可能となる。

- 1) 撤出し厚さの評価
- 2) 転圧中の沈下量の高精度かつ面的な評価
- 3) 地盤の圧縮ひずみの評価
- 4) 最終転圧面の標高データの評価

## 2.4 データ統合解析システム

**2.4.1 システム概要** データ統合解析システムは、 $\alpha$ システム、自走式散乱型RI、3Dレーザースキャナのデータを集約し、可視化を行うことができるアプリケーションである。各機器から送信されてきたデータは外部クラウドサービスのデータベースにストレージされ、その後各種計算処理、可視化が行われる。

**2.4.2 分析機能** データ統合解析システムは、Fig. 1に示すように、ヒートマップ、統計分析、転圧収斂分析、相関分析という4つの出力機能をもつ。各機能では転圧回数、乱れ率、地盤変形係数、含水比、乾燥密度、圧縮率の施工情報を、各層、各転圧回数で参照することができる。ヒートマップは従来の工法規定の転圧回数に加え、各種物性値の面的な分布状況を可視化し、局所的な変動を視覚的に表現できる。統計分析は各種物性のヒストグラムと平均値や標準偏差などの統計値を出力し、材料の変動の把握に活用する。転圧収斂分析は、乱れ率、地盤変形係数、乾燥密度の転圧回数ごとの全平均値を出力し、転圧の進行に伴う収斂の判断に活用する。相関分析は、含水比、地盤変形係数、圧縮率の相関関係から盛土材料の変動や転圧の不良原因を特定する際の補助資料として活用する。

## 3. 自走式散乱型RIの開発

### 3.1 計測器搭載部の仕様検討

自走式散乱型RIは計測器と地盤との間に離隔があると計測精度が低下することが知られている<sup>7-9)</sup>。そのため、計測器底面と計測地盤の離隔を可能な限り小さくすることに加え、距離を一定に保つことが要求された。

そこで、散乱型RIを搭載する自走式散乱型RIの計測器搭載部には、Photo 1に示すような車両と棒で連結したパラレルリンク機構を採用した。併せて、後部側にサスペンションを設けることで計測中の計測器搭載部の跳ね上がりを抑制する構造とした。車両寸法はL550mm×W515mm×H160mm(L:長さ、W:幅、H:高さ)、質量5kg程度とした。ホイールは全輪駆動とし、その場で方向転換することができる機構とした。操縦にはドローンの制御に用いられているオープンソースのソフトウェアArduPilotを利用した。計測領域の4点を指定することで走行経路を自動生成し、自走しながら含水比を計

測することができる。

### 3.2 計測精度への影響検討

**3.2.1 実験概要** 既述のように自走式散乱型RIの計測器は底面から計測地盤までに離隔（以下、クリアランスと称す）があると計測精度が低下する<sup>9)</sup>。そこで自走式散乱型RIの計測精度向上を目的に、クリアランスの影響について検討した。

実験はL2.0m×W1.0m×H0.4mの土槽を用いて行った。実験用地盤は、岐阜珪砂6号と黒ボク土を目標含水比 $w=20, 30, 40\%$ となるように混合し、それぞれ締固め度 $90\%$ となるように作製した。実験では、Photo2に示すように計測器と計測対象地盤のクリアランスを $0\text{mm} \sim 30\text{mm}$ まで $3\text{mm}$ ごとに変化させ計測を行った。計測はサンプリング周波数 $1\text{Hz}$ で1分間行った。計測終了後、計測箇所を採取し、炉乾燥法<sup>11)</sup> (JIS A 1203) により含水比の計測を行い、その値を真値として扱った。なお、含水比 $w$ は式(1)により算出した。

**3.2.2 クリアランスの影響検討** 実験により得られた計測含水比、補正後の含水比とクリアランスの関係をFig.5に示す。図中には炉乾燥法により得られた含水比を破線により併せて示している。

計測器で実測した含水比に着目すると、全ての地盤でクリアランスの増加に伴い、計測される含水比が減少していることがわかる。これはクリアランスの増加に伴い検出できる熱中性子の数が減少することが原因であると考えられる。そこで、クリアランス $x\text{ mm}$ での計数率比の補正率 $r$  (式(2)) を定義し、それぞれのクリアランスに対する補正率 $r$ を算出した。得られた補正率 $r$ とクリアランスの関係をFig.6に示す。クリアランスと補正率には正の相関があることがわかる。

この結果より各地盤の単回帰直線から、クリアランス $x\text{ mm}$ での補正率 $r_x$ を式(3)により各地盤で算出し、式(4)から割り増した計数率比を算定した。割り増した計数率比を式(1)に代入し、補正含水比を算出した。Fig.5に示すように、補正含水比はほぼ一定となり、炉乾燥法による含水比に対して相対誤差が $10\%$ 以下となった。

$$r = (R_{m0} - R_{mx}) / R_{mx} \times 100 \quad (2)$$

$$r_x = a x + b \quad (3)$$

$$R_{mxm} = R_{mx} (1 + r_x / 100) \quad (4)$$

$R_{mxm}$  :  $r_x$ により割り増した計数率比

$R_{mx}$  : クリアランスが $x\text{ mm}$ の時の計数率比

$R_{m0}$  : クリアランスが $0\text{ mm}$ の時の計数率比

$r$  : 補正率 [%]

$r_x$  : クリアランスが $x\text{ mm}$ の時の補正率 [%]

$a, b$  : 定数 (既知数)

## 4. PRISM実証実験

### 4.1 実験概要

実証実験は、大林組が施工中の滋賀県大津市の新名神

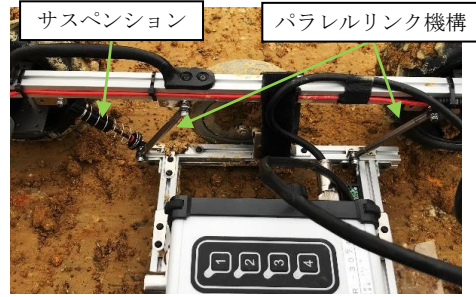


Photo 1 パラレルリンク機構  
Parallel Link

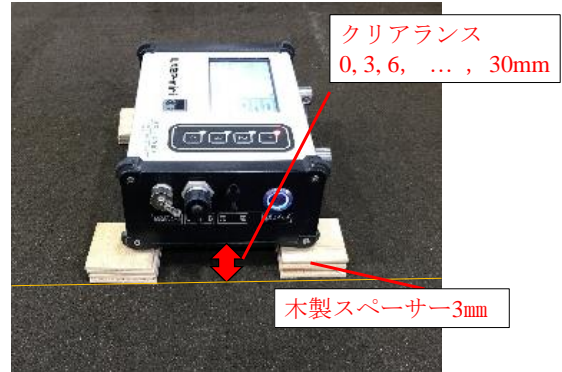


Photo2 クリアランスの影響検討実験状況 (検討1)  
Status of Experiment on the Effects of Separation

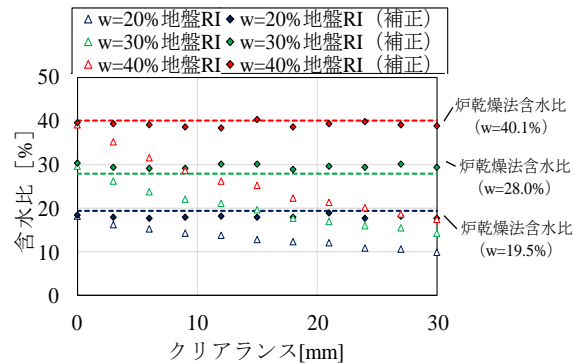


Fig. 5 計測精度に及ぼすクリアランスの影響  
The effect of Clearance on Measurement Accuracy

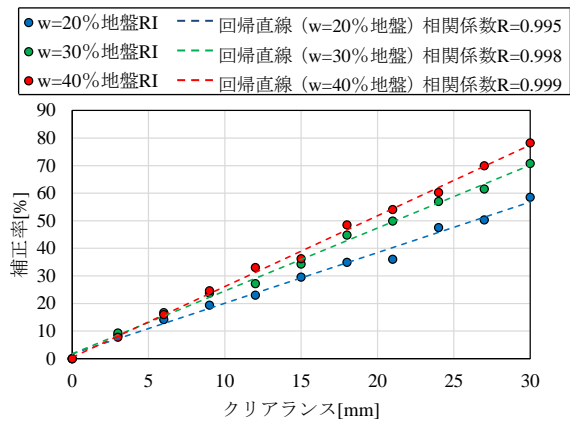


Fig. 6 クリアランスに対する補正率の関係  
Relationship between Correction Factor and Clearance



大石龍門建設工事の敷地内にて2022年1月～2月に実施した。当工事は新名神高速道路の本線の切盛土工，山城谷川橋および奥山田川橋の下部工の工事である。

実験はW32m×L22mのヤードで行い，ブルドーザによる1層30cmの敷均しと振動ローラによる転圧（最終転圧回数8回）を対象とした。

W8.0m×L22m×H0.3mを1日当たりの施工量とし，西から東に向かってヤードNo.1～ヤードNo.4とした。転圧中はαシステムのデータを取得し，転圧回数2，4，6，8回で3Dレーザースキャナ，最終転圧回数8回で自走式散乱型RIの計測を行った。取得したデータはデータ統合解析システムのデータベースに格納し，さらに分析機能を確認した。また，従来手法による品質管理を平行実施することで，本システムによる取得データの精度を確認した。

具体的には，Fig. 7に示す青丸の位置においてレベル測量で沈下量を，自動走査式RI密度水分計<sup>12)</sup>で乾燥密度を計測した。また，同図の赤丸の位置において小型FWD (Falling Weight Deflectometer)で地盤変形係数 $E_{PFWD}$ を計測した。なお，αシステムによる地盤変形係数は，平板載荷試験による地盤変形係数と相関があることが知られている<sup>5)</sup>。αシステムの精度確認のために，平板載荷試験の代替手法である小型FWDを現場試験として採用した。

#### 4.2 αシステムの計測結果

各ヤードでの小型FWDの地盤変形係数 $E_{PFWD}$ と転圧回数の関係をFig. 8に示す。Fig. 8より地盤変形係数 $E_{PFWD}$ は，転圧回数2回で概ね収束していることがわかる。

基盤層および盛土の各転圧回数でのαシステムによる地盤変形係数 $E_{roller}$ のヒートマップをFig. 9に示す。Fig. 9の転圧回数2～8回の地盤変形係数 $E_{roller}$ の分布に着目すると，ヤードNo.1，2では主に地盤変形係数 $E_{roller}$ が0～

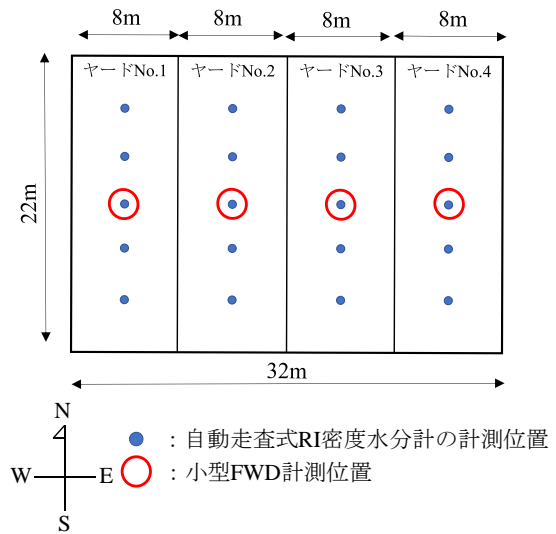


Fig. 7 従来手法による現場試験実施位置  
Field Test Location

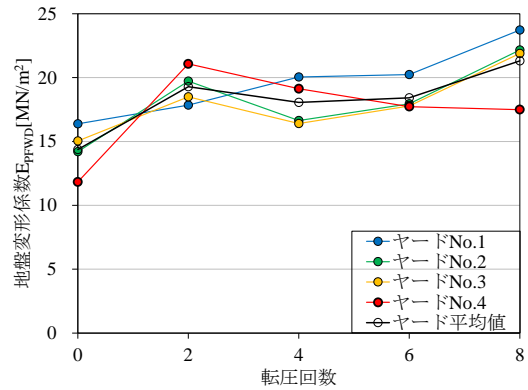


Fig. 8 地盤変形係数 $E_{PFWD}$ と転圧回数の関係  
Relation between Deformation Modulus and Number of Rolling Compaction

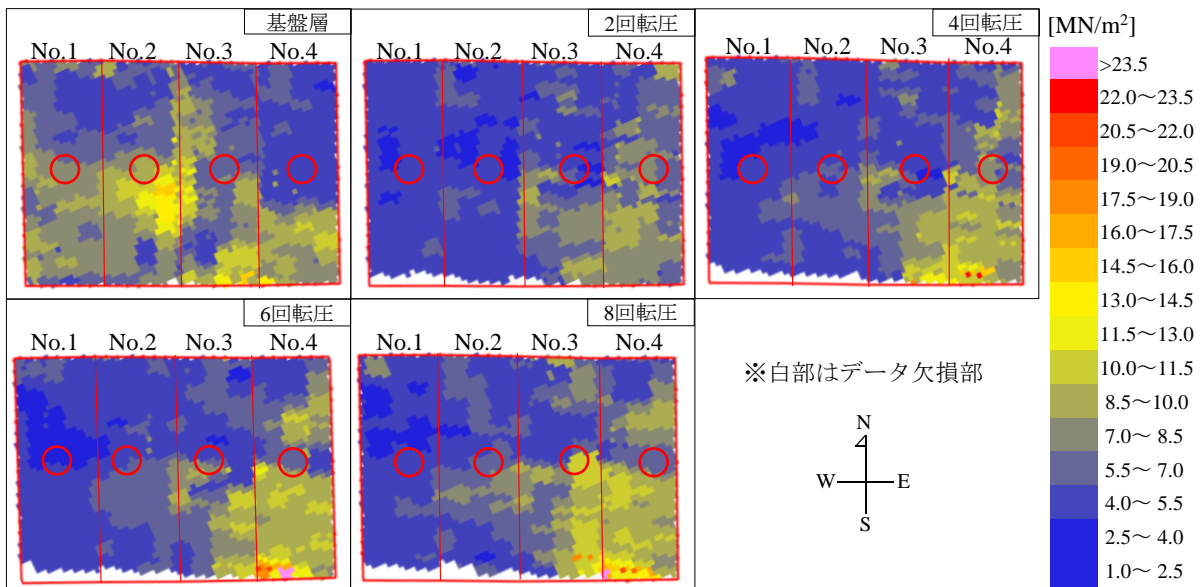


Fig. 9 基盤層および盛土の地盤変形係数分布  
Deformation Modulus Distribution of Base Layer and Embankment

7MN/m<sup>2</sup>程度の比較的剛性の低い領域が多く分布している一方で、ヤードNo.3,4は地盤変形係数E<sub>roller</sub>が10MN/m<sup>2</sup>以上の比較的剛性の高い領域が、転圧回数の増加とともに拡大していることがわかる。

Table 1に自動走査式RI密度水分計による各ヤードの盛土の含水比を示す。各転圧回数間で含水比に大きな差は無いが、No.1,2の含水比はNo.3,4に比べ若干大きい。これはヤードNo.1,2の剛性が増加しない一因である可能性がある。一方、ヤードNo.3,4では、転圧が進むにしたがって南側に、基盤層の剛性の特徴が大きくなる。Fig.9の基盤層の地盤変形係数E<sub>roller</sub>の分布に着目すると、南側が相対的に大きく、転圧の効果が高いと考えられる。また締固めが進行し表層の地盤剛性が高まると、基盤層まで振動が伝わり、加速度応答を捉えたと考えられる。本実験で使用した10t級振動ローラーにαシステムを適用した場合、その影響深度は70cm程度であることが知られており<sup>4)</sup>、本実験において、その影響が確認された。このようにαシステムの影響深度よりも撒出し厚さが小さい場合は、基盤層または前層の影響を考慮する必要がある。

4.3 3Dレーザースキャナの計測結果

本施工エリアで計測された3Dレーザースキャナのデータを用いて、式(5)～式(7)により算出した撒出し厚さ、沈下量、圧縮率のヒートマップをFig. 10に示す。沈下量と圧縮率は、一例として本工事において規定転圧回数とされている転圧回数4回後の結果を示している。

$$t = z_s - z_f \tag{5}$$

$$S = z_s - z_c \tag{6}$$

$$CR = S / t \tag{7}$$

- t : 撒出し厚さ
- S : 転圧時沈下量
- CR : 圧縮率
- z<sub>s</sub> : 撒出し後の施工面標高
- z<sub>f</sub> : 基盤層の標高
- z<sub>c</sub> : 転圧後の施工面標高

Fig. 10 (a) の撒出し厚さ分布については、今回試験工事であったこともあり、GNSSブルドーザーを用いた撒出しではなく、簡易杭を周囲に設置して目分量にて撒出しを行った。そのため、撒出し厚さには面的なばらつきが生じており、ヤードNo.1～No.4のヤード境界もヒートマップ上で確認することができる。このように、面的な撒出し厚さを捉えることで、均一な締固めを行う一助になる可能性がある。

Fig. 10 (b) に示す沈下量ヒートマップにも、同じようなヤード境界が確認でき、境界部の段差が一部確認できる。またFig. 10 (c) に示す圧縮率ヒートマップでは、各ヤード南側で圧縮率が相対的に大きくなっている。これは南側の基盤剛性が高く、転圧の効果が高まり圧縮率が大きくなったものと考えられる。

Fig. 11に転圧回数ごとの自動走査式RI密度水分計によ

Table 1 各ヤードの盛土の含水比[%]  
Water Content in Each Yard

転圧回数	No.1	No.2	No.3	No.4
0回	13.8	13.1	12.6	12.5
2回	13.1	13.0	12.6	12.4
4回	13.5	12.9	12.3	12.8
6回	13.1	12.9	12.4	12.4
8回	13.2	12.5	12.5	12.4

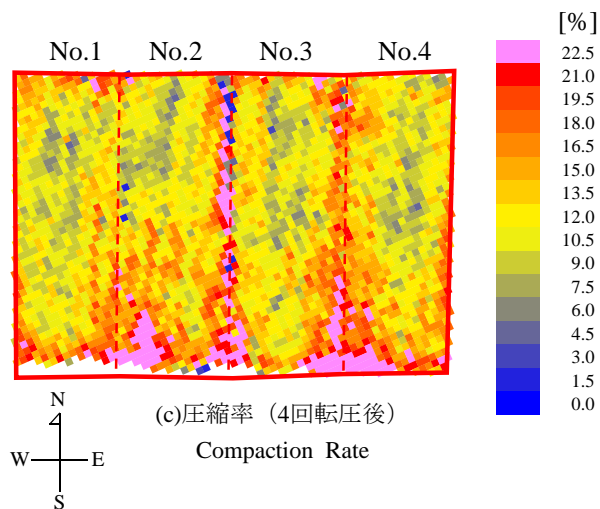
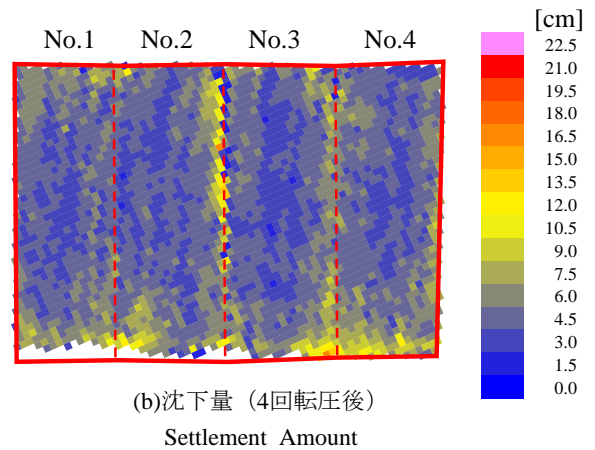
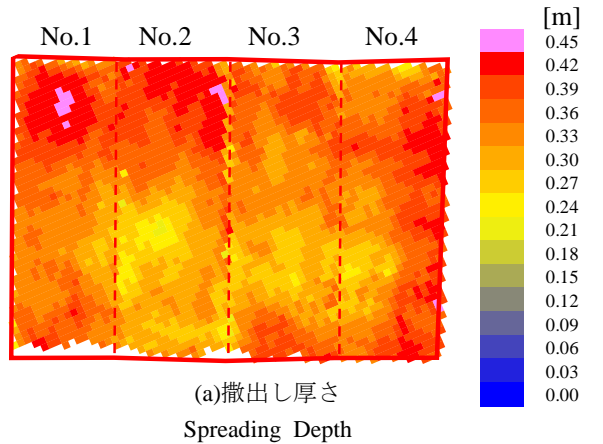
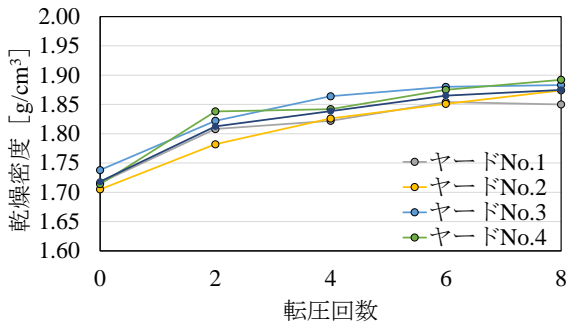
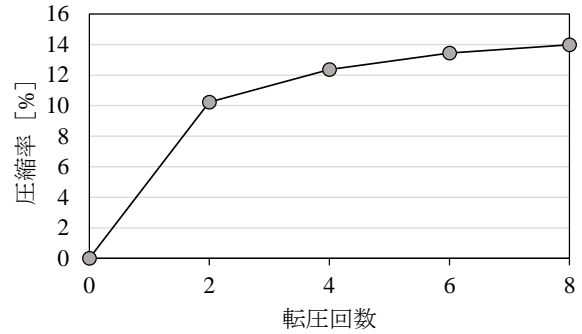


Fig. 10 3Dスキャナのヒートマップ  
Heatmaps made from 3D Scanner Date



(a)自動走査式RI密度水分計による乾燥密度



(b)レーザースキャナによる圧縮率算定結果

Fig. 11 乾燥密度の収斂性と圧縮率の収斂性の比較

Comparison of Density Convergence and Compression Ratio Convergence

る密度計測結果と、3Dレーザースキャナ計測結果から算定した圧縮率を示す。両者は同様の収斂傾向を示しており、レーザースキャナによる圧縮率の収斂性を用いた品質管理の可能性を示唆している。さらに、転圧回数4回では圧縮率の増加はおおむね収斂しており、本体工事の規定転圧回数である4回は適切であったことも裏付けている。

以上、3Dレーザースキャナを使用することにより、施工面全体の沈下量や撤出し層の圧縮率の推移、多点データを基に収斂を確認することが可能である。

4.4 自走式散乱型RIの計測結果

3章で検討した自走式散乱型RIの計測精度に及ぼす離隔の影響に関する知見から、計測値より得られる計数率比に割増しを行い計測を実施した。

Fig. 12に自走式散乱型RIによるヤード全体の含水比分布を示す。使用した盛土材料の含水比が面的に把握可能であり、その他の計測データと比較する事により、複合的な品質管理が可能となる。ヤード全体で約900点の含水比を計測しており、施工した盛土材料の含水比の平均値や分布が速やかに確認できる。またその計測値の有効性については、別途確認している<sup>13)</sup>。

5. まとめ

本稿では、本システムの概要について述べると共に、自走式散乱型RIの仕様検討および精度を検証するためのPRISM実証実験で得られた計測結果について述べた。

今回、実証実験で本システムを適用し、高度な盛土締固め品質管理を実現した。また、αシステム、自走式散乱型RIにより面的な自動計測を行い、施工エリア外から3Dレーザースキャナによる多点計測も行った。

すなわち、本システムの導入により、従来の現場試験のように施工エリアに立ち入ることなく、安心・安全な施工管理が可能であることを確認できた。今後、自走式散乱型RIやデータ統合解析システムの改良を行い、盛土の締固め品質管理のさらなる高度化および現場品質管理の省力化・無人化を目指す。以下に、得られた知見を述べる。

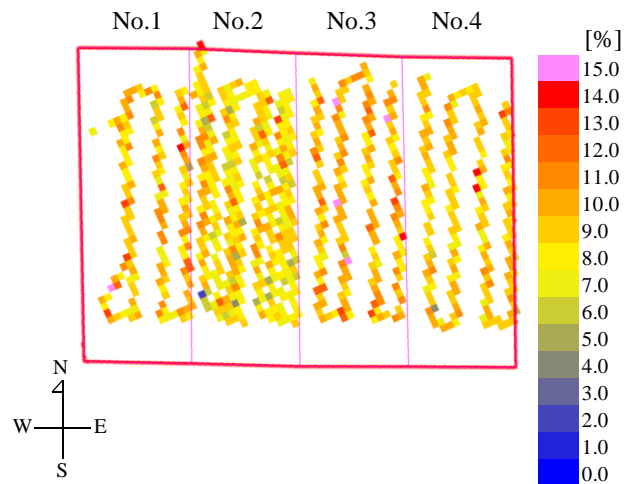


Fig. 12 自走式散乱型RIによる含水比の分布

Distribution of Water Content by the Self-propelled Scattering Type RI Moisture Meter

- 1) 自走式散乱型RIの計測機構について仕様検討を行った。パラレルリンク機構とし、サスペンションを付けることで計測器底面と離隔を一定に保つことが可能となった。
- 2) 自走式散乱型RIの計測精度確保を目的として、精度に及ぼすクリアランスの影響を検討した。その結果、クリアランスに対する補正率を考慮することで必要な計測精度を確保できることがわかった。
- 3) αシステムの影響深度よりも撤出し厚さが小さい場合は、基盤層の影響を考慮する必要がある。
- 4) 3Dレーザースキャナによる多点計測により、撤出し厚さを捉えることができ、面的な撤出し厚さの管理が可能である。
- 5) 3Dレーザースキャナによる多点計測により転圧面の収斂傾向を把握することができた。
- 6) 自走式散乱型RIの計測により施工エリアの含水比の面的な分布を把握することができた。
- 7) 本システムにより施工領域全体の性質を様々な観点から評価することが可能となり、ばらつきの大きい盛土工事における高度な品質担保を可能とした。

## 謝辞

本実験は、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」にて実施している。また本開発にご協力頂いた前田建設工業株式会社、ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社の関係者に感謝する。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路土工 盛土工指針（平成22年度版）」，2010.4
- 2) 古屋弘，藤原宗一，三好哲也：加速度計とGPSを利用した締固めの管理方法の高度化，建設の機械化，pp.20-25，2003
- 3) 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.652/Ⅲ-51，pp.115-123，2000
- 4) 中村洋丈，藤岡一頼，古屋弘，内山恵一，松本江基，浅田浩司：振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用～粗粒材料を対象とした大型土槽実験～，建設施工と建設機械シンポジウム，pp111-116，2013
- 5) 古屋弘，藤山哲雄：振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「 $\alpha$ システム」の開発と実用化，建設の施工企画 No.728，pp.42-46，2010
- 6) 古屋弘：加速度応答を用いた盛土のリアルタイム品質管理手法，大林組技術研究所報，No.77，2013
- 7) 谷口龍，池永太一，桑田岳治，日下寛彦，中島康介：散乱型RI水分計による簡易含水比測定手法の確立，第55回地盤工学研究発表会，2020.7
- 8) 千葉力，大村啓介，池永太一，塩見篤志：自動現場密度試験ロボット開発のための改良散乱型RI試験機評価，土木学会第72回年次学術講演会，VI-700，pp.1399-1400，2017
- 9) 谷口龍，池永太一，稲川雄宣，森俊行：自動走式散乱型RI水分計による含水比の面的計測，土木学会第76回年次学術講演会，VI690，2021.7
- 10) 高速道路総合研究所：「土工施工管理要領」，2020.7
- 11) 日本産業標準調査会：JIS A 1203（土の含水比試験方法）
- 12) 豊田光雄：自動走査式RI密度測定技術の開発と粗粒材料への適用，筑波大学大学院博士論文，2003.6
- 13) 松崎晃，古屋弘，稲川雄宣，石黒健，平田昌史，谷口龍：自走式散乱型RIロボットの開発，第20回建設ロボットシンポジウム，2022.8