

# 舗装工事における情報化施工技術の 適用検証と出来形管理手法の提案

(株)NIPPO コーポレーション	技術開発部	近藤 裕章
(同)	技術開発部	勝 敏行
(同)	生産技術機械部	梶原 寛

## 1. はじめに

情報化施工技術とは、調査、計画、設計、施工、維持管理において ICT（情報通信技術）を活用して、様々な情報を効率的に利用することで施工全体の合理化を行う技術である。この技術は大規模工事を中心に 10 年以上前より活用されているが、機器類の高性能化・低廉化に伴い、中小規模工事へも適用されるようになってきている。また、平成 20 年 7 月には、公共事業において情報化施工の普及促進を図るべく、国土交通省が「情報化施工推進戦略」を策定しており、今後益々広がりを見せる技術と期待されている。

舗装工事において情報化施工技術が適用できる分野としては、測量機器を用いた施工機械の 3 次元マシンコントロールシステム（以下、3D-MC）や出来形管理、締固め管理が考えられる。これらのうち、自動追尾トータルステーション（以下、TS）を用いたモータグレーダやブルドーザの 3D-MC は、近年、積極的な導入が試みられているものの「施工」のみが先行している状態であって、定量的な適用検証例の公表は極めて少ない。また、出来形管理にも一部利用されているものの、従来の施工方法を前提とした従前の管理方法の準用であって、情報化施工技術の利点を活かしたものはなっていないのが現状である。

このような状況を鑑みて、筆者らは舗装工事に TS を適用するに当たり、機器の測定精度や制御精度についての検証を行うと共に、情報化施工技術を活かした新しい出来形管理方法について検討したので以下に報告する。

## 2. TS を用いた情報化施工システムの概要

### 2-1 TS

TS は水平、鉛直方向の角度と距離を同時に測定し、3 次元位置情報を出力する光学測量機器であり、対象物を自動で追尾する機能と測定データを無線で外部記憶装置へ出力する機能を搭載している。人による視準、操作は不要であるため、遠隔操作による一人での出来形検測作業や 3D-MC が可能になる。また、夜間やトンネル内等、通常の測量機器では測定が難しい場合でも、自動追尾機能により正確な視準、測定を行うことができる。

### 2-2 検測装置

検測装置は、出来形検測や測定データの記録を行うものであり、プリズム、ポール、データコレクタで構成される（写真-1）。データコレクタに 3 次元設計データや管理点座標値を登録し、管理点や任意点での出来形検測を行う。これによって、設計高との差や位置の確認ができるため、丁張りの無い施工が可能になる。



写真-1 出来形検測状況

## 2-3 3D-MC システム

TS を用いた 3D-MC は、施工機械内のコンピュータに  
入力した 3 次元設計データと、TS により取得される施  
工機械の 3 次元位置情報、センサによる施工機械の姿勢  
情報から、任意の位置での高さの差を算出し、ブルドー  
ザやモータグレーダの排土板の高さと横断勾配を自動制  
御するシステムである。人工衛星電波を利用した測位シ  
ステム (GNSS) の 3D-MC のように、電波取得のため  
に上空視界を確保する必要はないので、高層ビル群の街  
路やトンネル内にも適用することができる。TS を基準  
点上、もしくは後方交會法により未知点に設置して稼働  
させる。施工機械には 3 次元設計データ等を入力したコ  
ントロールボックス、プリズム、無線受信機、センサを  
取り付ける。

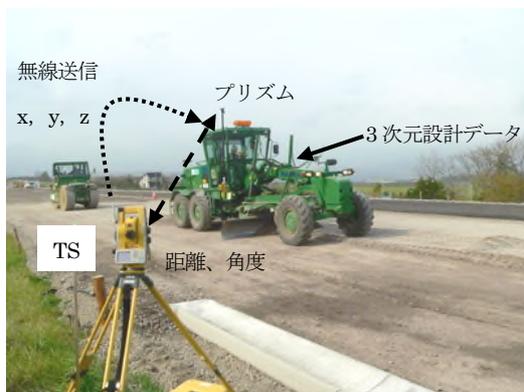


写真-2 3D-MCのイメージ

TS を用いた 3D-MC の導入による主なメリットは、次  
のとおりである。

### (1)品質の向上

従来の施工では丁張位置のみの高さ管理であったが、  
3次元設計データを用いた面での高さ管理により、面全  
体の仕上がり精度が向上する。

### (2)施工の省熟練化

従来は丁張りを高さの目安とし、オペレータが施工機  
械を操作していたため、仕上がり精度はオペレータの技  
量に左右されていたが、敷きならし操作の自動化により  
オペレータの技量に左右されず、精度を確保できる。

### (3)作業の効率化

従来施工に比べ少ない回数で仕上がるため、条件にも  
よるが、1日当たりの施工量が 20%程度向上する<sup>1)</sup>。ま  
た、丁張り設置作業の大幅な削減や 1 人での検測作業が  
可能になる。

### (4)安全性の向上

施工機械まわりの検測作業者が減り、接触事故が低減  
される。また、敷きならし操作の自動化によりオペレー

タは運転作業に気を配ることができる。

## 3. 実用化の検証

舗装工事における TS を用いた 3D-MC や出来形検測  
での実用化に向けて、機器の測定精度や施工機械の制御  
精度を把握し、舗装工事での要求水準を満足することの  
確認を目的として、機器の基本的な性能の確認試験を行  
った。

### 3-1 3次元測位精度

TS の 3 次元測位精度は、測定距離や気象条件に影響  
されることが予測できるため、各種条件の下、既知点を  
測定して測定値のばらつきを確認した。測定には、トプ  
コン社製の TS を使用し、検測装置により測定操作と 3  
次元位置情報の記録を行った。

#### (1)高さ測定精度

測定精度に及ぼす影響が大きいと考えられる気象条  
件のひとつに「かげろう」が考えられる。その影響を確  
認するため、かげろうの有り/無しの条件の下、20m ご  
とに既知点を各 100 回測定した。その結果を図-1に示す。  
これより、かげろうの有無にかかわらず、高さ測定値の  
ばらつきと測定距離には強い相関があり、測定距離が長  
くなるほど、ばらつきが大きくなっていることがわかる。  
かげろうが発生している状況下では、無い場合と比較す  
ると、100mを超えたあたりから測定値のばらつき之差  
が大きくなっている。また、検測装置が静止状態であ  
っても TS の視準にはプリズムを中心とした揺れがあり、  
距離が離れるに従って追尾不能状態が発生した。標準偏  
差は測定距離が 140mで最大となり、 $\sigma=1.8\text{mm}$ であ  
った。

このように、かげろうにより追尾不能となることは問  
題であるが、100m 以内での誤差は 2~3mm であるた  
め、舗装工事での利用には問題ないといえる。

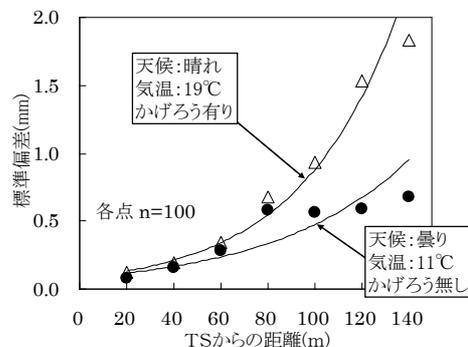


図-1 かげろう発生時の測定距離と高さ精度

#### (2)平面測定精度

かげろうが高さ測定精度に影響を及ぼすことから、高

さ測定と同時に取得した平面座標値 (x,y) より、角度測定精度と距離測定精度に分割し、平面位置の測定精度の確認を行った。

かげろうが無い場合では、角度測定精度と距離測定精度共に、測定距離との相関は見られなかった。しかし、かげろうが発生している状況下では、測定距離が長くなるにつれて角度測定精度のばらつきが大きくなり、強い相関が見られた (図-2)。ばらつきは最大で、角度測定方向  $\sigma=2.6\text{mm}$  (140m)、距離測定方向  $\sigma=0.8\text{mm}$  (100m) であった。平面誤差により計画高の算出に誤差が発生し、路面の勾配が急なほど誤差が大きくなるが、一般的な道路勾配での利用ならば、その誤差は1mm程度であるため、実用上問題無い。

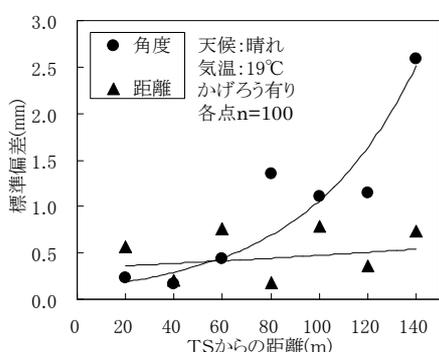


図-2 かげろう発生時の測定距離と平面精度

### (3) その他の天候による影響

降雨がTSの高さ測定精度に及ぼす影響について、TSから100mの位置の測定を行った。降水量1mm以下の弱雨の場合は問題なく測定でき、誤差もほとんど見られなかった。強雨の場合はかげろう発生時と同様に追尾不能となる現象が生じ、測定値のばらつきが多少大きくなったが、その誤差は2~3mmであった (図-3)。このことから、TS本体の対物レンズやプリズム等の水膜によってレーザー反射光が屈折、吸収されるため、追尾機能や測定精度に影響を及ぼすと考えられる。

霧が発生している場合、目視できる程度でもレーザー反射光がTSまで戻ってこないことがあり、計測距離が大きく制限される。

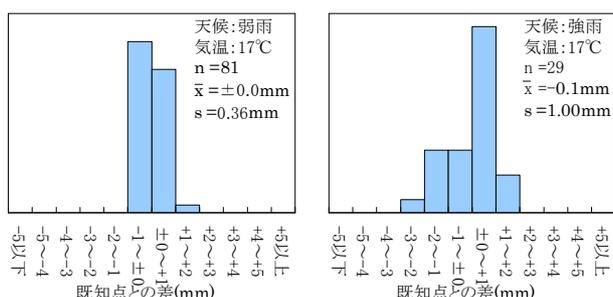


図-3 雨天時の高さ測定精度

## 3-2 TSを用いた3D-MCの検証

### (1) 施工機械の準備作業

精度を確保するには、施工機械のセンサのキャリブレーションおよび油圧制御パラメータの設定を行わなければならない。これらを実施しないと排土板の異常動作の原因となり、敷きならし面に段差や不陸等が発生することがある (写真-3)。油圧制御パラメータは、排土板の動作の速さ (ゲイン)、遊び (バルブオフセット)、不感帯域 (デッドバンド) 等、多岐にわたる。また、施工機械が同一機種でも個体差があるため、排土板の動きを見ながら調整しなければならず、メーカーや経験者の指導が必要である。



写真-3 異常動作による敷きならし面の不陸

### (2) TSの設置位置の検討

TSと施工機械との間が遮蔽された場合、または近接により施工機械の速度がTSの最大追尾速度を上回った場合、TSは施工機械を見失い、その間は自動制御が停止してしまう。作業中断防止のため、事前に設置場所を検討する必要がある。

### (3) 油圧制御の精度

3D-MCの油圧による自動制御の精度を確認することを目的として、停止状態での排土板高さを測定した。ブルドーザの場合、排土板の中央部はTSの高さ情報による制御、両端部は勾配センサ情報による制御が行われる。モータグレーダの場合、プリズム側は高さ情報による制御、反対側は勾配センサ情報による制御である。



写真-4 3D-MC用ブルドーザとモータグレーダ

自動制御の状態では停止させ、排土板の両端部をレベルで測定し、設計高との差を確認した。測定位置のずれによる計画高の誤差をなくすため、縦横断勾配が無い3次元設計データを用いた。制御距離は40~120mとし、距

離による精度への影響を確認するため、かげろうの発生していない状態で試験を実施した。

測定結果を表-1に示す。制御距離の違いでは精度に差は無く、ブルドーザは  $\sigma=2.7\text{mm}$ 、モータグレーダは  $\sigma=1.9\text{mm}$  であった。両者とも TS の高さ測定精度よりもばらつきが大きくなっている。油圧制御の精度を良くするには、センサのキャリブレーションを正確に行う必要がある。

表-1 排土板高さ測定結果

制御距離	項目	ブルドーザ	グレーダ
TS から 40~80m	$\sigma$ mm	2.7	1.9
	範囲 mm	12	8
	平均 mm	+2.6	+2.5
TS から 80~120m	$\sigma$ mm	2.7	1.9
	範囲 mm	10	8
	平均 mm	+0.4	-0.3

#### (4) 敷きならし精度

TS を用いた 3D-MC によるブルドーザとモータグレーダの碎石の敷きならし精度の確認を行った。横断形状を 3 パターン (LEVEL、両勾配、ひねり)、制御距離を 40~80m、80~120m に設定し、延長 40m、幅員 6 m の 3 次元設計データを 6 種類作成した。敷きならし後は転圧を行わず、敷きならし面をレベルで 30 点ずつ測定し、計画高との差を確認した。碎石は RC-40 を使用し、施工速度は 1 速とした。敷きならし時、かげろうが発生していないことを確認して試験を実施した。

ブルドーザでの敷きならし精度の測定結果を表-2に示す。 $\sigma=3.9\sim 5.2\text{mm}$  で、設計形状を問わず安定した結果が得られた。測定距離による敷きならし精度には、明確な違いは見られなかった。停止状態での精度と比較すると、標準偏差が 1~3 mm 増加しており、走行や振動によりばらつきが増大したと思われる。しかしながら、土工事だけでなく舗装工事での仕上げ作業にも十分対応できると考える。

表-2 ブルドーザの敷きならし精度

	横断形状	距離(m)	範囲(mm)	平均(mm)	$\sigma$ (mm)
1	LEVEL	40~80	19	-1.3	4.6
2		80~120	18	-0.3	5.2
3	3%両勾配	40~80	17	-1.2	4.1
4		80~120	17	-5.5	3.9
5	5%→3%ひねり	40~80	19	-4.1	4.3
6		80~120	18	-8.3	4.5

モータグレーダでの敷きならし精度の測定結果を表-3に示す。 $\sigma=1.9\sim 4.7\text{mm}$  で、ブルドーザと比較すると精度の変化が大きい結果となった。今回は制御距離や設計形状に違いによっても違いが見られ、停止状態での精度と比較すると、標準偏差が最大で 3 mm 増加している。モータグレーダはブルドーザに比べて排土板の幅が広いため、油圧制御パラメータの設定が適切でない場合、設計形状等により敷きならし精度の変化が大きくなると考えられる。安定した精度を得るためには、適切な油圧制御パラメータの設定が重要であると思われる。

表-3 モータグレーダの敷きならし精度

	横断形状	距離(m)	範囲(mm)	平均(mm)	$\sigma$ (mm)
1	LEVEL	40~80	6	+1.2	1.9
2		80~120	12	+6.4	2.8
3	3%両勾配	40~80	12	-2.4	2.6
4		80~120	23	-1.1	4.7
5	5%→3%ひねり	40~80	14	-1.4	3.6
6		80~120	17	+6.0	4.3

以上の検証結果から、3D-MC での最終的な仕上がり精度は、TS の測定精度による影響はわずかであり、油圧制御の精度や敷きならし精度による影響が大きいことがわかった。油圧制御の精度については、油圧バルブの性能に依る割合が大きいと思われるが、センサキャリブレーションを正確に実施することが重要である。敷きならし精度については、油圧制御パラメータの適切な設定や設計形状に応じた施工速度の調整等の工夫が必要であると考えられる。

#### (5) 実路工事への適用

精度試験結果から実施工でも適用可能であると判断し、実路での工事において TS を用いた 3D-MC を試行して、要求水準を満足することを確認している<sup>2)</sup>。

## 4. 出来形管理手法の提案

### 4-1 これまでの出来形管理

舗装工事での出来形管理は、高さ、厚さ、幅員、平坦性があり、それぞれ異なった方法で管理が行われている。高さ管理は丁張りを利用するため、丁張りの設置されている場所でしか測定することができない。また、厚さ管理は仕上がったものを掘り起こしたり、コア抜きを行う必要があり、品質にも影響を及ぼすため、多くのデータの取得は望ましくない。このため、少ないデータで

高さや厚さの判定を行っており、面として評価しているとはいえない。

## 4-2 任意点での管理

TS を用いた出来形管理では、定点を探して高さ測定を行うのは効率が悪いが、任意の位置での測定は瞬時に行え、多くの点を効率的に測定することができ、出来形を面的に取得することができる。また、各層の高さの差を厚さの確認に利用すれば、仕上がったものを壊さず面的に厚さを把握することができる。

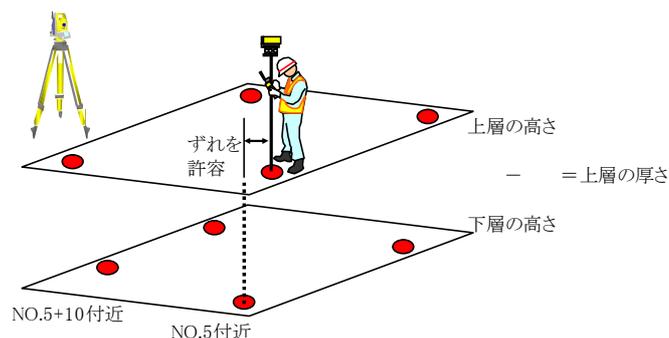


図-4 任意点での測定

## 4-3 統計的手法を用いた厚さの推定

任意点での高さ管理を行う場合は、平面位置が一致しないため、高さの差から直接的に厚さを算出することはできない。しかし、統計的手法を用いれば、高さデータから厚さの推定を行うことができる。測定結果が正規分布に従うと仮定し、正規分布の加法性を利用して厚さの分布を推定し、合否判断に利用する方法を用いる。正規分布の加法性は、2つの正規分布の集団からランダムに1つずつ値を取り出し、その和または差を要素とする新しい集団は正規分布に従うという性質のことである(図-5)。

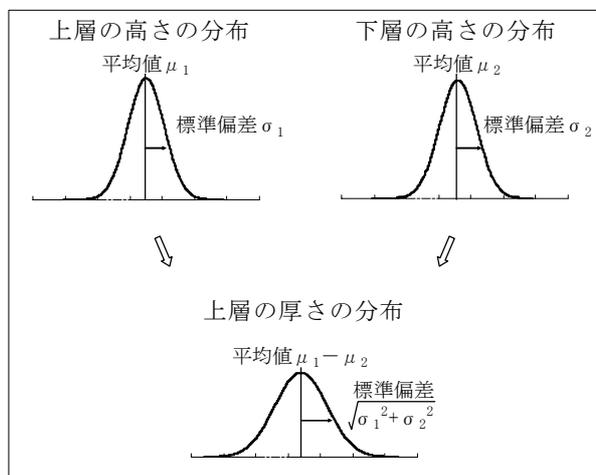


図-5 正規分布の加法性を用いた厚さ分布

## 4-4 新たな出来形管理手法

実際の舗装工事で取得した上層路盤、下層路盤の高さデータから、前述の統計的手法で上層路盤の厚さを推定した。

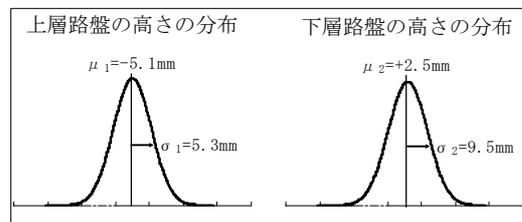


図-6 厚さの算定例

図-6に示すように、上層路盤の高さが平均値-5.1mm、標準偏差 5.3mm、下層路盤の高さが平均値+2.5mm、標準偏差 9.5mm の場合の上層路盤の厚さを区間推定し、合否判定する。

上層路盤の厚さは正規分布の加法性から、平均値は  $-5.1 - 2.5 = -7.6\text{mm}$ 、標準偏差は  $\sqrt{5.3^2 + 9.5^2} = 10.9\text{mm}$  の正規分布に従う。厚さの信頼区間は以下の式で表される。

$$t = (\mu_1 - \mu_2) \pm k \cdot \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

t : 厚さ (mm)

$\mu$  : 平均値 (mm)

$\sigma$  : 標準偏差 (mm)

k : 合格判定係数

ここでは  $k=1.48$  (路盤工における望ましいロットの不良率 7%)、規格値は  $-25\text{mm}$  とする。上式から上層路盤の厚さの信頼区間は  $-7.5 \pm 16.1\text{mm}$  となり、信頼区間の下限値は  $-23.6\text{mm}$  であるため、厚さの出来形が規格値を満足すると判定できる(表-4)。

表-4 厚さの算定結果

工種	基準高(mm)		厚さ(mm)		
	平均値	標準偏差	規格値	信頼区間の下限値	判定
上層路盤	-5.1	5.3	-25	-24	○
下層路盤	2.5	9.5			

このように、統計的手法を用いることで任意点での厚さを推定することができるため、TS を用いた出来形管理のメリットを最大限に活かし、高さや厚さの管理をTSでの測定に一本化することが可能と考える。また、高さ測定データを正規分布として扱うには、データ数を30点以上確保すれば十分と思われるので、ロットごとに合否判定を行うことができる。ただし、面的な把握を目的としているため、片寄りのない測定が必要である。



図-7 ロットでの管理のイメージ

## 5. 今後の課題

### 5-1 出来形精度の向上

実際の施工では、敷きならし精度のほかに材料の種類や施工厚、前層の凹凸による転圧後の不等沈下、路床の支持力等の様々な条件により、出来形精度は変化する(図-8)。さらに、従来施工に比べて少ない回数で仕上がるのが仇となり、敷きならし機械自体での締固め効果が減るため、従来施工よりも締固め機械での転圧を充分に行わないと、満足する出来形精度は得られない。また、システムを運営する技術者が精度向上のためのノウハウを持ち、的確に指導する必要がある。

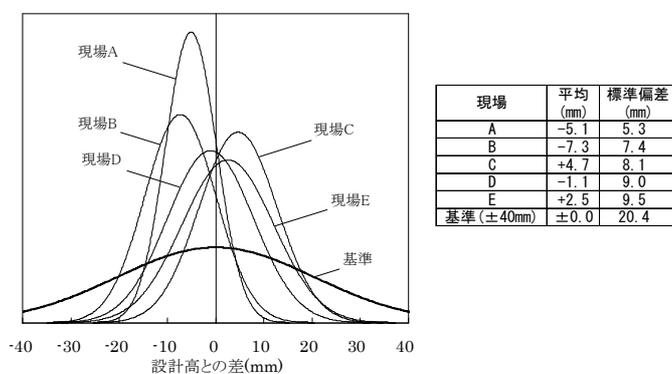


図-8 モータグレーダでの出来形例

### 5-2 技術者の育成

3D-MC システムを運営するには、設計や施工などの土木分野、測量分野、機械分野、コンピュータ等、広い範囲の知識が必要になる。現状では、知識や経験を備えた技術者が不足傾向にある。

システムのトラブルに対処するには、知識と経験を備えた技術者の指導が不可欠となり、即時対処できないと結果的に日施工量が低下してしまい、メリットを活かすことができない。これらのことから、3D-MC の導入には技術者の育成が必要となっている。

## 6. おわりに

実用化の検証を終え、情報化施工の認知度も高まってきたことから、現在では多くの現場で TS を用いた 3D-MC が導入されている。今後は現場での精度や施工性、トラブルとその対処方法を調査し、精度の向上や施工性の改善を図っていきたい。情報化施工技術のさらなる進展のためには、3D-MC だけでなく、TS の利点を最大限に活用した出来形管理方法など各プロセスへの積極的な活用、さらには 3次元データなどの情報を設計から維持管理まで一連で利用できるようなシステムの確立が望まれる。

[参考文献]

- 1) 勝、片岡、梶原：舗装工の情報化施工、建設の施工企画、No. 680、pp. 24~28 (2006. 10)
- 2) 近藤、立花、若本：舗装工事における三次元マシンコントロールシステムの現状と TS-MC による安定処理路盤の施工事例、舗装、Vol. 43、pp. 13~17 (2008. 8)