

7. MC モータグレーダ導入による効果について

(国研)土木研究所
(国研)土木研究所
(国研)土木研究所

○ 橋本 毅
梶田 洋規
藤野 健一

1. はじめに

国土交通省では平成28年4月より新たな施策である「i-Construction」を開始し、その中で ICT 技術の全面的な活用を進めることによる建設現場の生産性向上を図っている。建設現場で使用される ICT 技術の一つにマシンコントロール（以下 MC）があるが、これは TS や GNSS などを用いて施工機械の位置を把握し、その位置における設計値（あらかじめ入力された設計データ）と作業装置（ブレードなど）との差を算出し、作業装置が設計値に添うよう自動的にリアルタイムで制御を行う技術のことであり、オペレータの負担を軽減することによる施工の効率化や高精度化などが期待されている。しかしながら、その導入効果を試験ピットなどにおける実験などにて定量的に把握した例は少なく、施工条件等を調整した基礎実験による、効果の定量的な把握が、さらなる普及を促進する上で必要とされている。

筆者らは昨年（2015年）、MC 施工の優位性を定量的に明らかにすることを目的とし、6名のオペレータとモータグレーダを用い施工条件を同一にした2つの試験場にて従来施工と MC 施工の比較実験を行った。その結果、MC 施工を用いると作業時間の短縮、出来形バラツキの改善が図れ、その効果は非熟練オペレータの方が熟練オペレータより高いことなどがわかった。しかし昨年の結果では、平坦性に関しては MC 施工による明確な効果は見いだせなかった。また、MC 施工がオペレータへ及ぼす影響については定量的な検証は実施していなかった。そこで本年（2016年）は、昨年と同様な実験を行い、作業時間、出来形バラツキに対する MC 施工導入効果の再検証を行うとともに、平坦性に対する効果についても再度検討を行った。また、MC 施工がオペレータへ及ぼす影響を調査するために、心拍数計測装置および視線計測装置をオペレータに装着して実験を行った。

なお、本研究は土木研究所と民間企業5社（鹿島建設、鹿島道路、トプコンソキアポジショニングジャパン、西尾レントオール、NIPPO）による共同研究にて行った。

2. 実験概要

2.1 実験概要

実験は昨年（2015年）と同様に行った。以下概要を述べる。

幅6m、全長70m（直線部45m、曲線部25m）の路床を2レーン用意し、その路床上に厚さ30cmになるよう路盤材料（M40）をモータグレーダにて敷き均す実験を行った。モータグレーダは MC システムを搭載した機体を使用し、No.1レーンは MC を使用せずに（従来施工）、No.2レーンは MC を使用して（MC 施工）施工を行った。実験状況を図-1に示す。また実験は一般的な施工と同様に、直線部10mピッチ、曲線部5mピッチで設定した測点における仕上がり高さが、設計高さ（基準高さ）±1cm以内になった時点で終了とした。

2.2 データ計測

実験結果として以下のデータを測定した。①～④は昨年も計測したものである。

- ① 施工開始から終了までにかかった時間
- ② 仕上がり高さ計測回数
- ③ 施工終了後、中央・右・左の3測線上1mピッチの仕上がり高さ（出来形）。TSにて計測（図-2）
- ④ 施工終了後、ローラにて締固めを行い、Fig. 2に示した左2.5m測線上の平坦性。3mプロファイルメータを用いて測定
- ⑤ 施工中のオペレータ心拍数。心拍数計測装置



図-1 実験状況

にて計測（EPSON 社製：SF-850）

- ⑥ 施工中のオペレータ視線. 視線計測装置にて計測（NAC 社製：EMR-9, 図-3）

2.3 オペレータ

表-1 に示す様々な経験を持ったオペレータにて実験を行った。なお、Bさん、Cさん、Dさん、Eさんの4名は2015年、2016年両方に参加したオペレータである。Aさんは2015年と2016年では両方とも熟練者であるが別人であるため、2015年ではA'さんとした。同様にFさんも両方非熟練者であるが別人であるため、2015年ではF'さんとした。Aさん、A'さん、Bさんは熟練者（経験15年以上）、Dさん、Eさん、Fさん、F'さんは非熟練者（経験10年未満）といえることができる。

3. 実験結果

3.1 施工時間

2015年と2016年の実作業時間データ（延べ12名）の、熟練者の平均、非熟練者の平均、全体の平均を図-4に示す。なお、実作業時間とは後進や計測作業などを含まない、敷均し作業のみの時間のことである。

図-4によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより実作業時間が短縮され、その短縮率は熟練者では10.0%、非熟練者

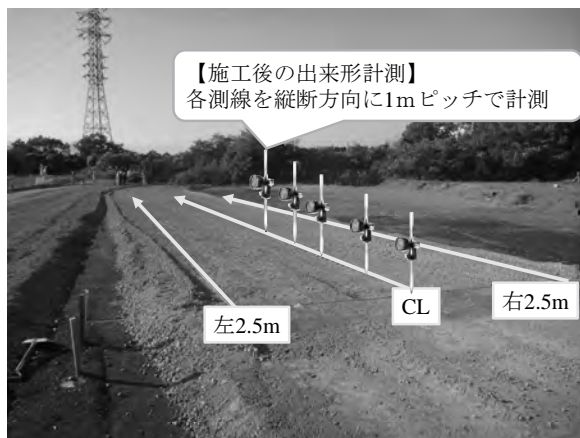


図-2 出来形計測状況



図-3 視線計測装置

では37.2%となっており、非熟練者の方がMC施工導入による作業時間短縮効果が高いことがわかる。さらに非熟練者にMC施工を導入した場合、ほぼ熟練者並みの実作業時間で施工できる可能性があることもわかる。

3.2 仕上がり高さ計測回数

2015年と2016年の仕上がり高さ計測回数（延べ12名）の、熟練者の平均、非熟練者の平均、全体の平均を図-5に示す。

図-5によると、オペレータの熟練度によらずMC施工を導入することにより仕上がり高さ計測回数が少なくなり、その短縮率は熟練者では

表-1 オペレータ

2015年			2016年		
	年齢	業務経験年数		年齢	業務経験年数
Aさん	52	33	Aさん	57	35
Bさん	36	16	Bさん	37	17
Cさん	33	10	Cさん	34	11
Dさん	30	8	Dさん	31	9
Eさん	23	5	Eさん	24	6
F'さん	22	1	Fさん	24	2

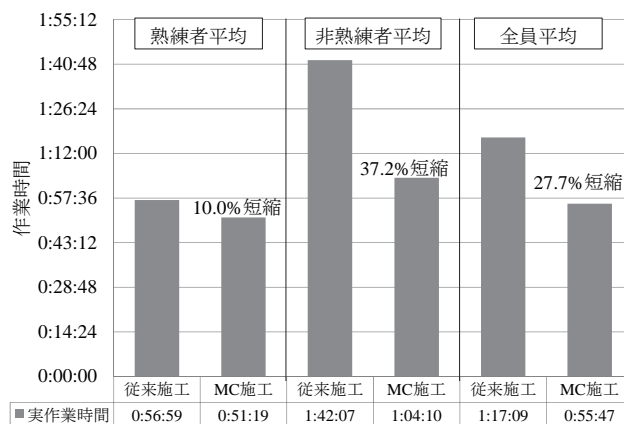


図-4 作業時間

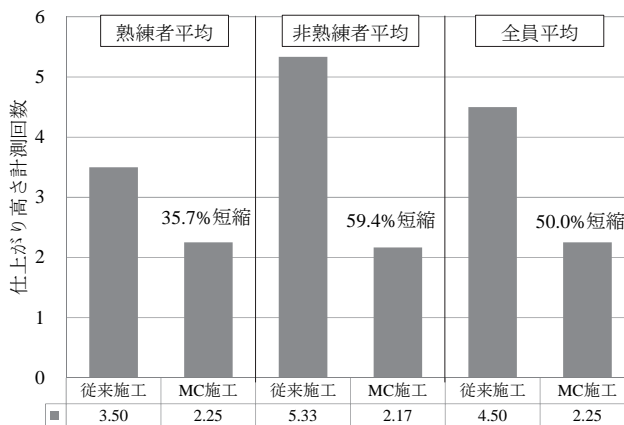


図-5 仕上がり高さ計測回数

35.7%，非熟練者では 59.4%となっており，非熟練者の方が MC 施工導入による仕上がり高さ計測回数短縮効果が高いことがわかる．さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合，ほぼ熟練者並みの仕上がり高さ計測回数で施工できる可能性があることもわかる．

3.3 出来形バラツキ

2015 年と 2016 年の出来形データ（延べ 12 名）の度数分布図を図-6 に示す．なお，度数分布は設計値（目標高さ）からの乖離で表しており，標準偏差も示してある．

図-6 によると，MC 施工を導入することにより出来形バラツキが改善されることがわかる．そこで，熟練者，非熟練者，全体の標準偏差を図-7 に示す．

図-7 によると，オペレータの熟練度によらず MC 施工を導入することにより出来形バラツキが改善され，その改善率は熟練者では 20.6%，非熟練者では 50.9%となっており，非熟練者の方がその改善効果が高いことがわかる．さらに非熟練者に MC 施工を導入した場合，ほぼ熟練者並みの出来形バラツキで施工できる可能性があることもわかる．

また，実験は 2 章で述べたように，終了判定である「一般的な施工と同様に，直線部 10m ピッチ，曲線部 5m ピッチで設定した測点における仕上がり高さが，設計高さ（基準高さ）±1cm 以内」を満足したことを確認して終了したが，図-6 によると，±1cm 以内に収まっていない点も存在している．つまり，図-6 の測定は 1m ピッチで行っているため，直線部 10m ピッチ，曲線部 5m ピッチで設定した上記測定点以外は基準を満たしていない点が存在することを表している．これは実施工においても同様のことが起こっていると考えられ，今後計測手法の高度化により従来よりも多点での計測が可能となった場合，施工管理基準を見直す必要がある可能性を示している．i-Construction ではこの点も考慮に入れた規格・基準の策定が行われており，今後 i-Construction 適用範囲の拡大にむけて，さらなる検討も行っていきたい．

3.4 平坦性

2015 年の平坦性測定結果を図-8 に，2016 年の平坦性測定結果を図-9 に示す．平坦性は数値が低い方が滑らかであることを示している．

図-8，9 によると，熟練者（A さん，B さん，A' さん）の平坦性は，MC 施工導入すると全員従来施工より悪化するという同じ傾向を示していること，また C さんは両年とも MC 施工導入により平坦性が向上していること，他のオペレータ（非熟

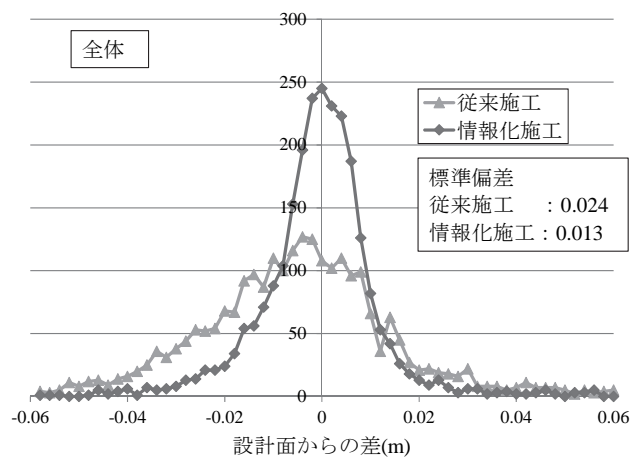


図-6 出来形分布（全体）

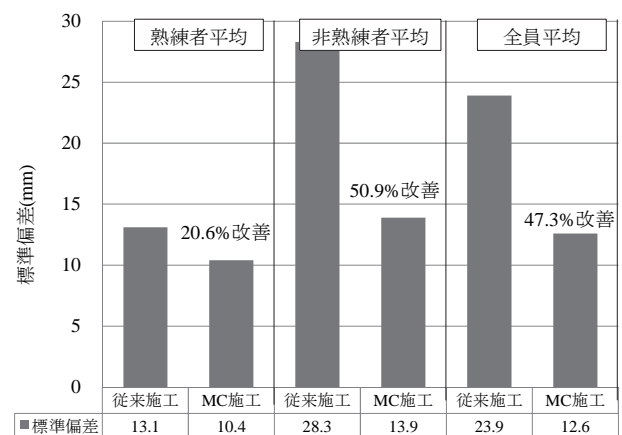


図-7 出来形標準偏差

練者）は MC 施工導入による平坦性への効果はオペレータによってまちまちであり，かつ同一オペレータでも実験年によって傾向が異なる（D さん）ことがわかる．

平坦性とは仕上げ面の滑らかさを表す指標であり，一般的に，施工中に設計値（目標高さ）へ近づくよう急激にブレードを操作すると，バラツキ（目標値からの乖離）は改善するが平坦性は悪化し，滑らかにブレードを操作すると，バラツキは改善しないが平坦性は向上する．以上のことを踏まえて考えると，熟練者（A さん，B さん，A' さん）はこの平坦性の特徴をよく理解しており，通常施工を行う際はブレードを走行速度などに合わせ適度に滑らかに操作することにより，バラツキと平坦性を高いレベルで両立するよう操作していたが，MC 施工を導入した場合，ブレードの上下操作は MC コントローラが行うため，今回の MC コントローラ設定では，バラツキは良好であったが熟練者の通常施工の高い平坦性は実現できなかったものと考えられる．図-10 に B さん（熟練者）の平坦性測定前（ローラ締固め後）左側線を，出来形計測と同様に TS を用いて 1m ピッチで測定

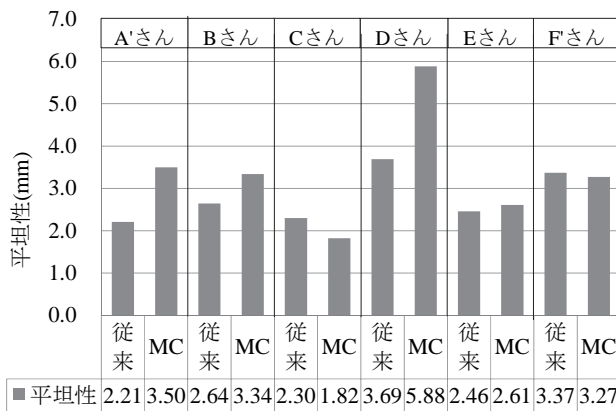


図-8 平坦性 (2015年)

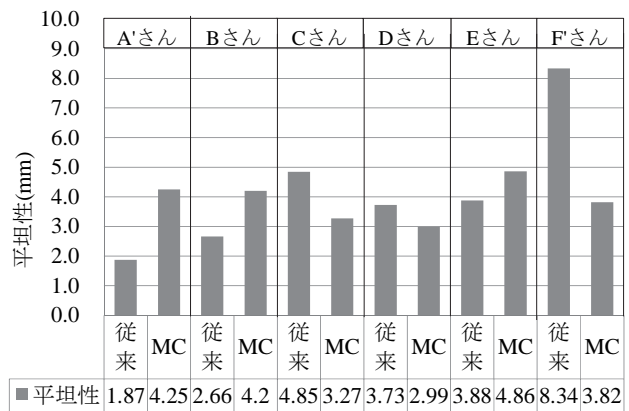


図-9 平坦性 (2016年)

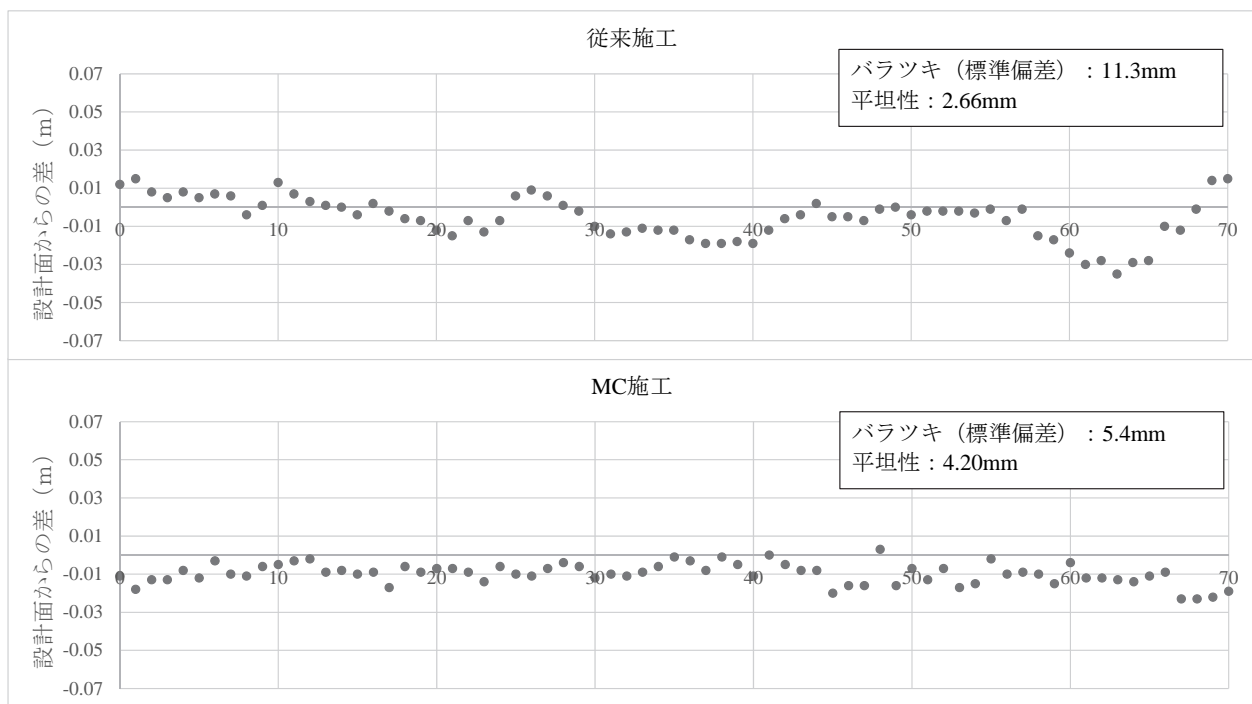


図-10 締固め後出来形 (Bさん, 2016年)

した結果を示す。図-10からも上記のこと、すなわち従来施工では熟練者であるBさんがブレードを滑らかに操作し、バラツキと平坦性を高いレベルで両立させようとしていること、MC施工ではバラツキを向上させるためにMCコントローラがブレードをやや急激に操作しているため、バラツキは少ないが平坦性が少し劣ることが確認できる。

なお、Cさんは、MC施工の社内トレーナー(社内オペレータにMC施工を教育する)として勤務しているためMCコントローラ設定の特徴をよく理解しており、MC施工を用いた方がバラツキと平坦性を高いレベルで両立できたものと考えられる。一方非熟練者は、走行速度などがオペレータおよび実験年などでまちまちなため、傾向がバラバラになってしまったものと考えられる。

3.5 心拍数

表-2 心拍数 (bpm)

	従来施工時	MC施工時
Aさん	106	101
Bさん	127	87
Cさん	110	90
Dさん	118	104
Eさん	98	84
Fさん	117	124

2016年の心拍数測定結果を表-2に示す。

表-2によると、Fさんを除くすべてのオペレータにて、MC施工を導入すると心拍数が低下していることがわかる。心拍数のみで断定することはできないが、MC施工を導入することで、熟練度に寄らず、オペレータ負担が低減される可能性があることがわかる。またFさんのみMC施工を導入しても心拍数はほぼ変化しなかったが、これは

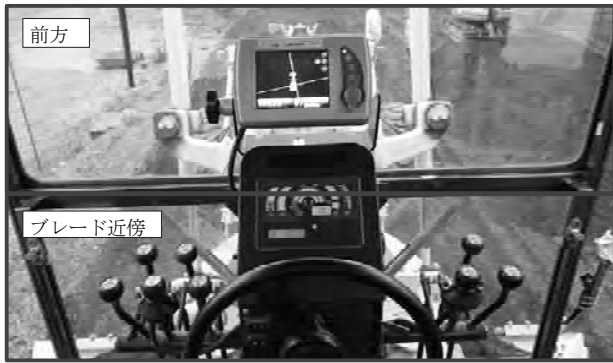


図-11 視線領域

入社1年目のFさんの実験を行う際に、上司がつきっきりで見学していたため、従来施工、MC施工ともに緊張が続き高い心拍数となってしまったためと考えられる。

3.6 オペレータ視線

オペレータの視界を、図-11に示すように、ブレード近傍、前方、その他(図-11の範囲外、レバー、モニターなど)の3つに分け、仕上げ施工中の視線が0.1秒以上停留している時間割合を整理した。なお、Bさん、Eさんは視線データが取得できなかった。整理結果を図-12に示す。

図-12によると、従来施工の場合、Aさん(熟練者)はブレード近傍を見ている時間割合が70%弱であるのに対し、他の3名は約90%程度あることがわかる。これは、熟練度が低い場合、材料を敷き均しているブレード近傍にばかり集中し、周辺状況の把握ができていないが、熟練者は前方にも注意を払い、走行経路の状況を予測することで、円滑で高品質な施工を行っていると考えられる。また、MC施工を導入するとすべてのオペレータでブレード近傍を注視している時間割合が減少しており、特にDさん、Fさんという非熟練者ほど大きく減少している。これはMC施工によりブレード操作にそれほど注意を払わなくてもよくなり、周辺に注意を払う余裕が生まれたためと考えられる。このことから、MC施工の導入は高品質で円滑な施工を可能とするだけでなく、周辺状況に注意を払うことでより安全な施工を可能とするとも言える。

4. 新たなMC技術の提案

前章にて、熟練オペレータは従来・MC施工ともに、非熟練オペレータに比べ多くの時間を前方確認に費やしていることがわかった。この理由を熟練オペレータにヒアリングしたところ、走行コースの確認とともに、前輪が地面の不陸(凹凸)を避けるように注意を払っているとの意見が得られた。モータグレーダはその構造上、前輪の上下

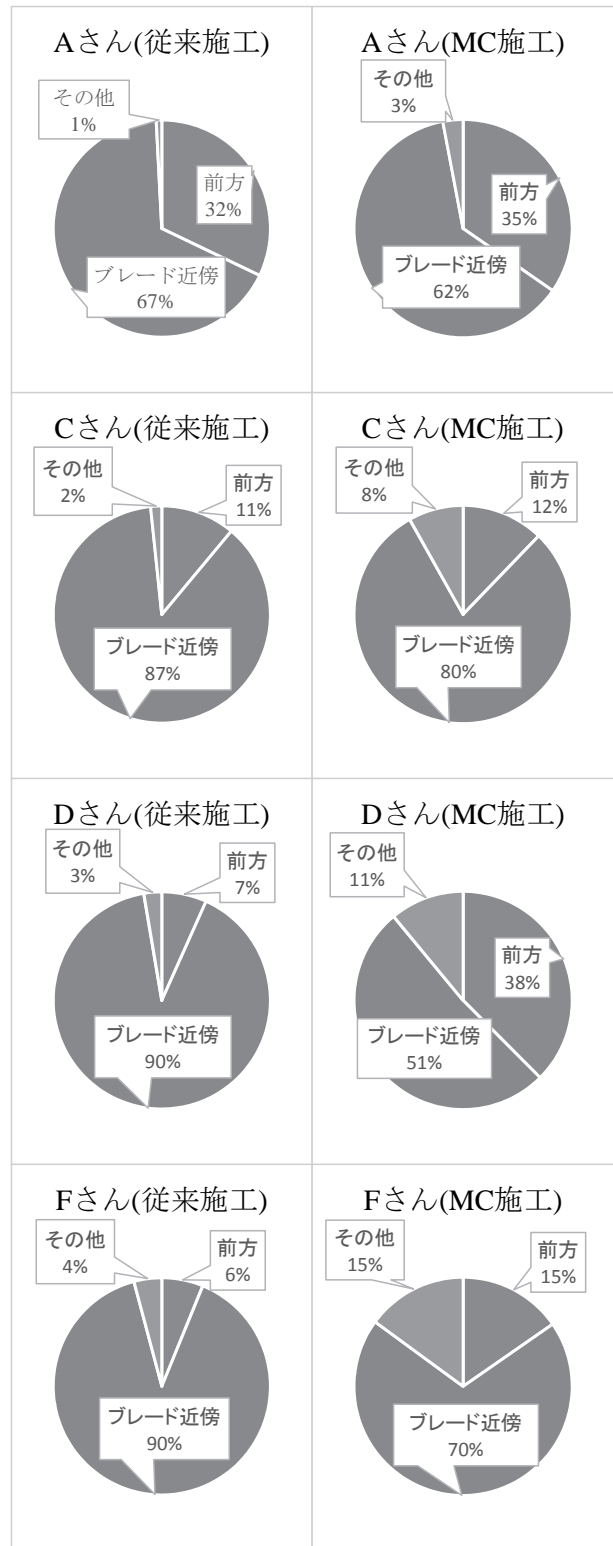


図-12 視線解析結果 (停留時間割合)

動がブレードに直接伝わるため、前輪が不陸に乗り上げる(落ちる)と施工面を乱してしまうことになる(図-13)。この乱れは一度発生すると改善することが難しく、敷均しを繰り返すことで次々と伝播し、最終的にホイールベース1/2ピッチの波打ちを残してしまう現象が発生することがある。この現象を避けるため、熟練オペレータは、前方

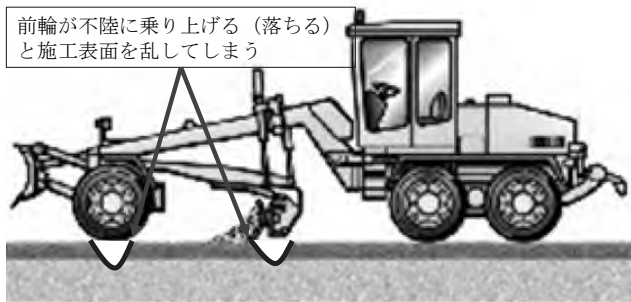


図-13 モータグレーダの特性

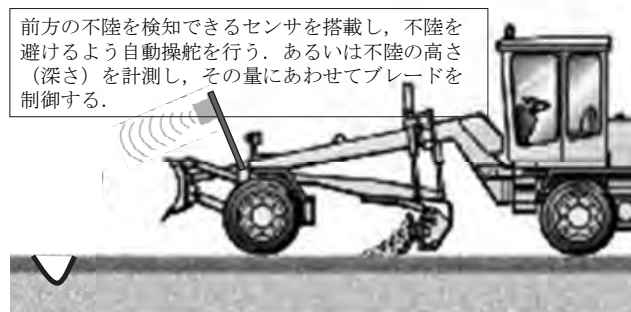


図-13 新たなMC技術の提案

に注意を払い前輪が不陸を避けるよう運転を行っていると考えられる。

以上から、モータグレーダにおける新たな MC 技術として以下のものが提案できる。

モータグレーダ前方にレーザスキャナ等前方の不陸を検知できるセンサを搭載し、不陸を避けるよう自動操舵を行う。あるいは不陸の高さ（深さ）を計測し、前輪が不陸に達すると同時にその量にあわせてブレードを制御し、仕上げ面の乱れを防ぐ。（図-14）

今後この新技術の可能性について検討を行っていききたい。

5. まとめ

モータグレーダ路盤敷均し工において、施工条件を同一にした 2 つの試験場にて従来施工と MC 施工を行った結果、MC 施工を導入することにより施工品質とオペレータ負担、安全性に以下の効果があることが判明した。

- (1) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより作業時間の短縮が期待できる。その効果は熟練者では約 10.0%、非熟練者では約 37.2%と非熟練者の方が高く、非熟練者がほぼ熟練者並みに施工できる可能性がある。
- (2) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより仕上がり高さ計測回数の削減が期待できる。その効果は熟練者では約 35.7%、非熟練者では約 59.4%と非熟練者の方が高く、非熟

練者がほぼ熟練者並みに施工できる可能性がある。

- (3) すべてのオペレータにて MC 施工を導入することにより出来形バラツキの改善が期待できる。その効果は熟練者では約 20.6%、非熟練者では約 50.9%と非熟練者の方が高く、非熟練者がほぼ熟練者並みに施工できる可能性がある。
- (4) MC 導入による平坦性への効果はオペレータ毎にまちまちであり、特に熟練者ではすべてのデータで MC 導入により平坦性は悪化した。熟練オペレータは通常施工では、ブレードを走行速度などに合わせ適度に滑らかに操作することにより、バラツキと平坦性を高いレベルで両立するよう操作しているが、今回の MC コントローラ設定ではバラツキは良好であったが通常施工の高い平坦性は実現できなかったものと考えられる。
- (5) 6 名中 5 名のオペレータで、MC 施工を導入することで施工中の心拍数が低下しており、オペレータ負担を低減できる可能性がある。
- (6) 視線データが取得できたすべてのオペレータにて、MC 施工導入によりブレード近傍注視時間割合が減少し、機体周辺を目視で確認する時間割合が増加しており、より安全な施工ができる可能性がある。

2015 年と 2016 年の研究成果より、モータグレーダを用いた MC 施工の効果を、施工効率・品質・オペレータへの影響、について詳細に把握することができた。その結果、MC 施工の導入により、非熟練者が熟練者並みの時間、品質、安全性などで施工することが可能となることが確認できた。わが国では今後熟練オペレータの大量退職が予想され、経験が浅いオペレータの生産性を向上させることが急務となっているが、MC 施工の普及は、この問題への有効な対策であると考えられる。本研究結果が MC 施工の普及に貢献できると期待している。

また本研究結果から、下記 2 点についても新しい課題を得ることができた。

- (1) 今後計測手法の高度化により従来よりも多点での計測が可能となった場合、従来の品質管理基準値を満たさない値が計測されることが予想される。そのため施工管理基準の再検討が必要と考えられる
- (2) 熟練オペレータからのヒアリングにより、モータグレーダ前方の不陸に対応した、新たな MC 技術を提案することができる。

今後上記 2 つの課題についても、検討を行っていききたい。