

S 4. 遠隔操作型バックホウの操作技能評価に関する試験研究

(社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 飯盛 洋

1. はじめに

遠隔操作が可能な建設機械を使用して人間が立ち入ることなく作業を行う無人化施工は、これまで雲仙普賢岳や有珠山の噴火災害を始めとする災害復旧現場等の危険地域における工事で数々の実績を上げてきた。また、近年、これまで想定していなかったような大規模災害の発生が増大しており、その復旧のために無人化施工の重要性はますます高まっている。

もし、このような事態が起きた場合に迅速に対処するためには、無人化施工機械システムを直ちに調達できる体制を整備しておくとともに、これらの機械を操作できる技能者を平時から育成・確保しておくことが重要である。しかしながら、現状では無人化施工機械の操作技能に習熟しているかどうかを評価する明確な指標はまだない。

本研究は、無人化施工機械の操作技能習熟度を評価する指標を検討することを目的として、遠隔操作型バックホウを用いた模擬作業試験を行い、オペレータの無人化施工の経験の違いによる技能の差すなわち作業効率や施工品質の違いを明らかにしようとしたものである。なお、本試験研究は国土交通省総合政策局より受託した「平成 22 年度高度な技術を有する技能者の活用・育成推進に係る検討業務」の一部として実施したものである。

2. 模擬作業試験の内容

2.1 概要

遠隔操作による模擬作業試験は、施工技術総合研究所構内の作業試験場にて、施工機械から約 100 m 離れた場所に遠隔操作室を設置し、そこから直接機械を見ることなく、車載カメラおよび外部固定カメラのモニタ画面のみを見て所定の作業を行うという方法で実施した。また、遠隔操作（無人化施工）と搭乗運転（有人施工）との差を見るために同じ模擬作業を搭乗運転でも行った。そして、試験時の作業効率（時間、作業能力）や施工品質を測定し、オペレータの技能の差を評価した。

2.2 使用機器

試験に使用した施工機械は、無人化施工で最も多く適用されている遠隔操作型バックホウ（特定

小電力無線使用、搭乗運転可能）とし、バケット容量 0.9m³ のものを使用した（写真-1）。

カメラは車載カメラ 2 台（足元用と前方用）と外部固定カメラ 2 台（施工機械をほぼ直角の 2 方向から見る）の計 4 台を使用した。画像伝送用機器は、車載カメラの画像伝送用無線には小電力データ通信システム（2.4GHz）を使用し、外部固定カメラの画像伝送は有線式を使用した。

遠隔操作室内にはモニタディスプレイを 3 台設置し、中央の 1 台は車載カメラ 2 台の画像を切替えていずれか 1 画面を表示し、左右のモニタには外部固定カメラの画像を常時表示した（写真-2）。

2.3 被験オペレータ

オペレータは無人化施工の経験の異なる 3 名で、搭乗運転に関してはいずれも 10 年以上の経験を持つベテランである。3 名の無人化施工の経験年数は以下のとおりである。

- ・オペレータ A：無人化施工経験年数 10 年
- ・オペレータ B：無人化施工経験年数 3 ヶ月
- ・オペレータ C：無人化施工経験なし（練習 30 分）



写真-1 試験に供した遠隔操作型バックホウ



写真-2 遠隔操作室内のモニタおよび操作装置

2.4 試験方法

模擬作業試験の種類はバックホウの基本的動作である①掘削積込作業試験、②均し作業試験、③走行試験の3種類とした。それぞれの試験方法は以下のとおりで、搭乗運転、遠隔操作ともこれらを3回ずつ行った。

(1) 掘削積込作業試験

図-1に示した掘削範囲（一度掘り返した後、埋め戻した地盤）を掘削し、左90°の位置に配置した10tダンプトラックに掘削土を積み込み、元の位置に戻るといったパターンを5サイクル繰り返す。測定項目は以下のとおりである。

① 所要時間（サイクルタイム）

5サイクルの掘削積込動作（掘削、旋回、排土、旋回）の所要時間を測定する。

② 作業量（積込土量）

空車状態および積込後のダンプトラックの質量を測定し、5サイクルの積込量を求め、①と合わせて作業効率（t/h）を求める。

③ 施工品質（掘削位置決め安定性）

掘削範囲に対するバケットの左右方向のズレを測定し、位置決め安定性を評価する。

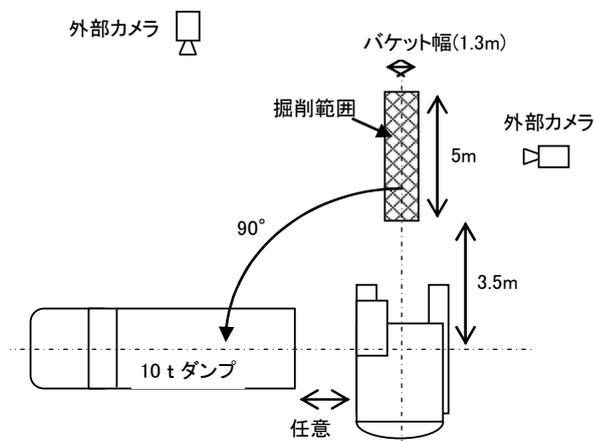


図-1 掘削積込作業試験のパターン

(2) 均し作業試験

図-2に示すような放射状に設定した5本の目標線にバケット中心位置を合わせ、バケットを立てて水平引きを行う（爪で地面を均す）。なお、この試験のみ外部カメラは1台とし、作業装置を側方（左右いずれか一方）から見る位置に設置した。測定項目は以下のとおりである。

① 所要時間（サイクルタイム）

5本分の均し動作（助走、均し、戻し）の所要時間を測定する。

② 施工品質（均し跡の平坦性）

均し跡を目標線の方に50cm間隔でレベルで測量し、平坦性を評価する。

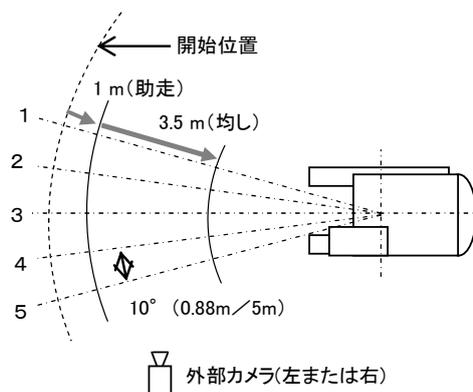


図-2 均し作業試験のパターン

(3) 走行試験

速度段は低速とし、図-3に示す走行コースを目標線に沿って直進、左90°旋回、再び直進するパターンとした。測定項目は以下のとおりである。

① 所要時間

一連の走行（最初の直進走行、左旋回走行、旋回後の直進走行）に要した時間を測定し、走行速度を求める。

② 施工品質（操舵の安定性）

目標線に対する走行跡（左側履帯の左端跡）のズレ量を1m間隔で測定し、操舵の安定性を評価する。

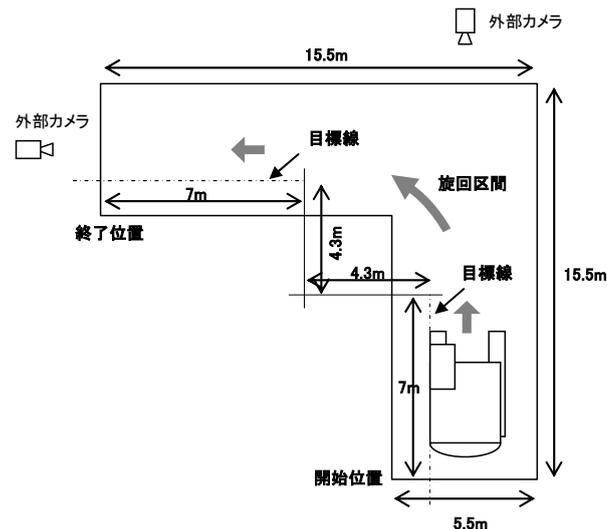


図-3 走行試験のコース

3. 試験結果および考察

3.1 掘削積込作業試験

(1) 作業効率（時間当たり作業量）

図-4は、横軸にサイクルタイムを、縦軸に1サイクル当たりの積込土量を取り、それぞれ5サイクルの平均値をプロットしたもので、一回帰帰式の傾きが作業効率（時間当たり作業量）を表す。

これによると、搭乗運転では3名とも熟練オペレータであるため、サイクルタイム、積込量ともオペレータによる差はあまりない。これに対し、遠隔操作では経験のないオペレータCはサイクルタイムが4倍程度に増えており、経験のあるオペレータA、Bと比較して作業効率は明らかに低い(B, A, Cの順)。

また、表-1の搭乗運転に対する遠隔操作の作業効率の比を見ると、経験のあるオペレータでも30~50%程度とかなり低く、経験のないオペレータでは24%で効率低下の度合いはより大きい。

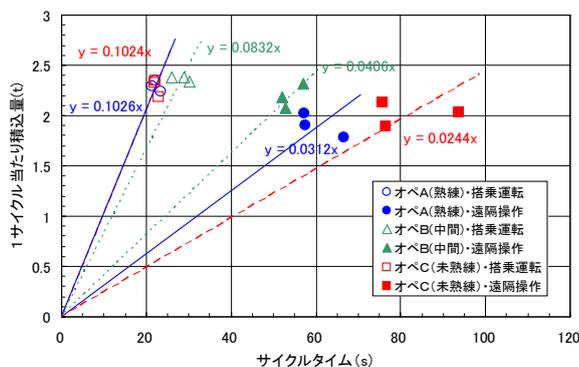


図-4 掘削積込作業試験におけるサイクルタイムと積込量

表-1 掘削積込作業試験における作業効率の比

オペレータ	作業効率の比 (遠隔操作/搭乗運転)
A(熟練)	0.31
B(中間)	0.48
C(未熟練)	0.24

(2) 施工品質 (掘削位置決め安定性)

図-5は掘削時の掘削範囲(予定位置)に対するバケットの左右方向のズレ量の5サイクルの平均値および振れ幅(変動範囲)を示したものである。この振れ幅の小さい方が掘削位置決めが安定しているといえる。また、各オペレータについて、搭乗運転、遠隔操作各3回の試験のバケットの振れ幅の平均値を比較したものが表-2である。

これより、全体として搭乗運転より遠隔操作の方が掘削時のバケット位置の振れ幅(ズレ量の変動範囲)が大きいことがわかる(1.5~4倍程度)。また、遠隔操作の経験のないオペレータCは、搭乗運転ではバケットの振れ幅が最も小さかったが、遠隔操作では最も大きくなっている(B, A, Cの順)。

(3) 技能習熟度の違い

遠隔操作による掘削積込作業試験では、遠隔操作の経験のないオペレータは、経験のあるオペ

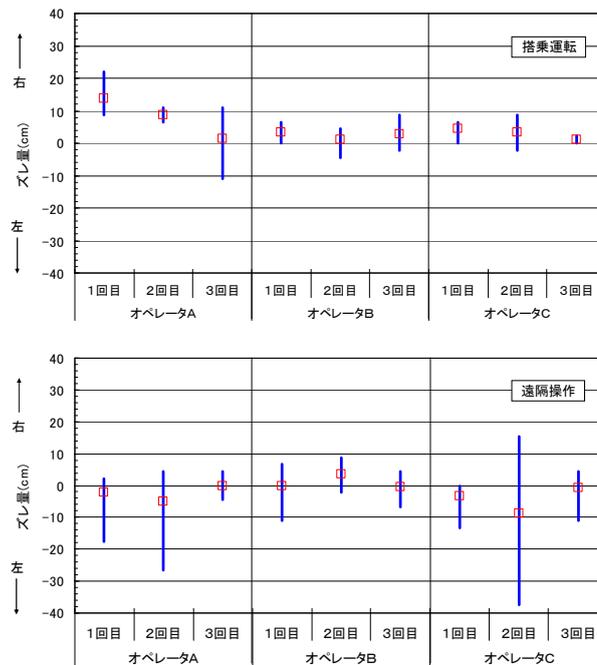


図-5 掘削時のバケットの左右方向ズレ量

表-2 掘削時のバケット位置の安定性
(左右方向の振れ幅の平均値)

オペレータ	搭乗運転	遠隔操作
A(熟練)	13 cm	20 cm
B(中間)	9 cm	13 cm
C(未熟練)	7 cm	27 cm

レータと比較して、作業効率(時間当たり積込量)および施工品質(掘削位置決め安定性)のいずれの面においても、やや低いことがわかる。

また、ともに遠隔操作の経験のあるオペレータの比較では、経験年数の短いオペレータの方が経験年数の長いオペレータより作業効率、施工品質の両面で上回っていた。これだけで結論づけることはできないが、これは搭乗運転の経験が十分な場合は、比較的短期間で遠隔操作技能を習得できる可能性があることを示唆しているともいえる。

3.2 均し作業試験

(1) 作業効率(サイクルタイム)

搭乗運転および遠隔操作による均し作業試験の平均サイクルタイムを図-6に示す。遠隔操作時の作業効率のオペレータによる差は搭乗運転時と同じ傾向で、オペAとオペCが同等、オペBのみサイクルタイムが長いという結果になり、遠隔操作の経験量には比例していない。

また、搭乗運転と遠隔操作のサイクルタイムの比(所要時間比)および作業効率比を表-3に示す。搭乗運転に対する遠隔操作の作業効率の比は所要

時間比の逆数であり、これは3人のオペレータとも40%前後で、掘削積込作業試験と同様、非常に低い値となった。

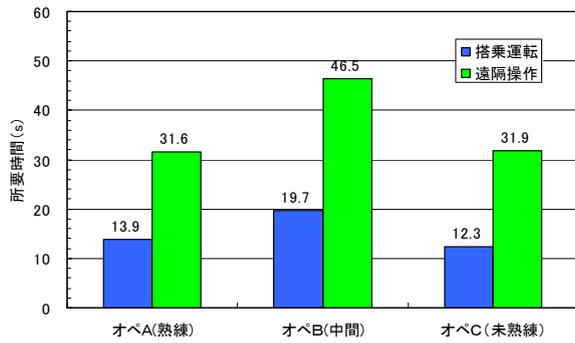


図-6 均し作業試験の平均サイクルタイム

表-3 均し作業試験のサイクルタイム、作業効率比

オペレータ	搭乗運転	遠隔操作	所要時間比 (遠隔/搭乗)	作業効率比 (時間比の逆数)
A(熟練)	13.9 s	31.6 s	2.27	0.44
B(中間)	19.7 s	46.5 s	2.36	0.42
C(未熟練)	12.3 s	31.9 s	2.59	0.39

(2) 施工品質 (均し跡の平坦性)

均し跡のレベル測量結果から直線回帰を行い、回帰式からの差の標準偏差を示したものが図-7である。これは、均し跡の平坦性(凹凸の程度)を示すものである。これより各均し跡の標準偏差の全体の平均値を求め、オペレータ毎に比較したものが表-4である。

これによると、程度の差はあるが、いずれのオペレータも搭乗運転より遠隔操作の方が数値が大きくなっており、平坦性は低下している。また、遠隔操作による均し作業試験の平坦性は、オペレータAとBは同等で、経験のないオペレータCがやや劣るという結果になっている。

表-4 均し跡の平坦性(標準偏差の平均値)

オペレータ	搭乗運転	遠隔操作
A(熟練)	5.7 mm	8.3 mm
B(中間)	8.0 mm	8.2 mm
C(未熟練)	6.4 mm	10.8 mm

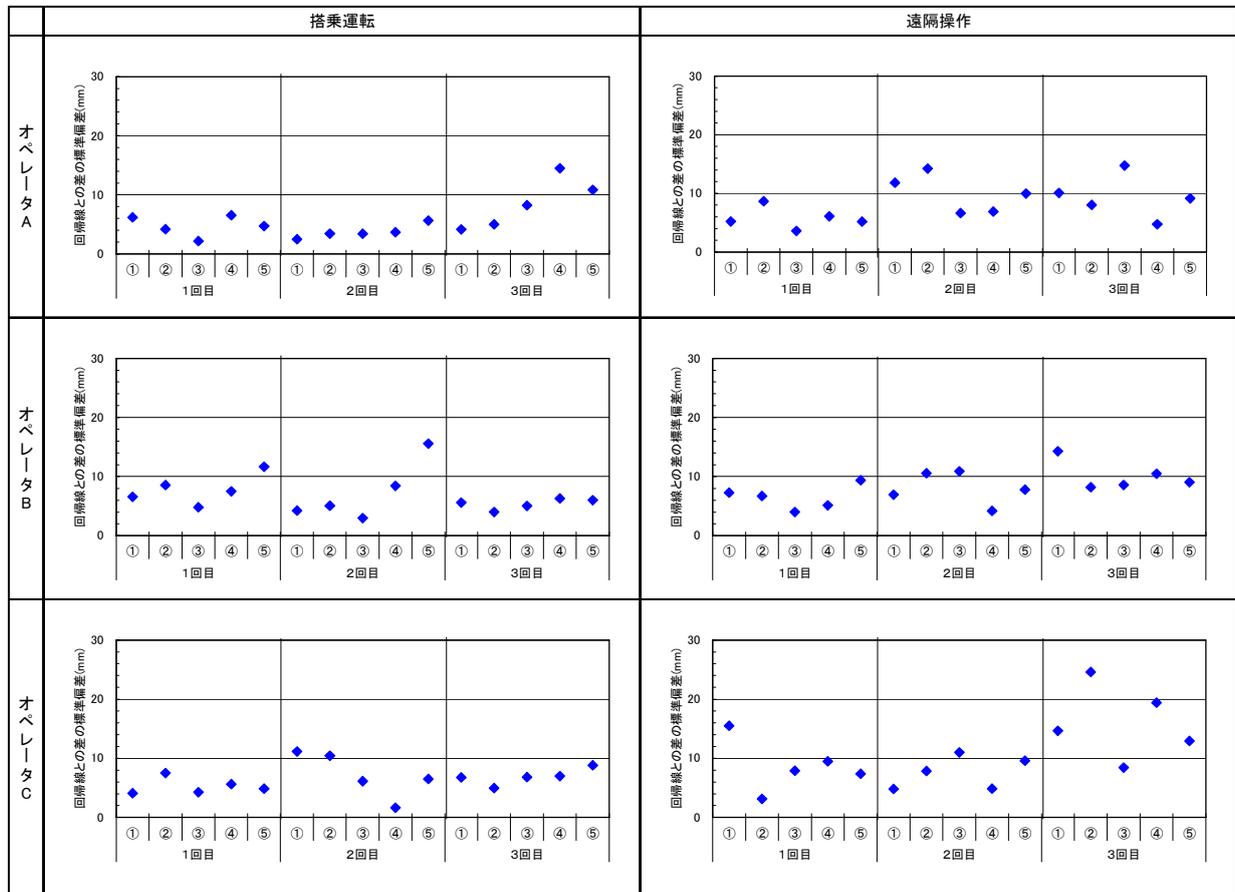


図-7 均し跡の平坦性(均し跡の一次回帰式からのバラツキ)

(3) 技能習熟度の違い

遠隔操作による均し作業試験では、作業効率（サイクルタイム）はオペレータの遠隔操作の経験の有無とは比例しなかったが、施工品質（均し跡の平坦性）については遠隔操作の経験のないオペレータは経験のあるオペレータに比べて低いことがわかる。

3.3 走行試験

(1) 作業効率（走行速度）

走行速度はエンジン回転数が支配的になるので、搭乗運転と遠隔操作でエンジン回転数が同じ条件における走行速度を比較した。その結果を図-8 および表-5 に示す。これによると遠隔操作時の走行速度は搭乗運転時の走行速度の70~90%程度となり、掘削積込作業や均し作業に比べると、効率低下はかなり少ない。

遠隔操作時の走行速度はオペレータ B だけがやや低く、オペレータ A と C は同等で、遠隔操作の経験の有無には比例していない。

なお、供試機械の最高速度（速度段：低速）の仕様値は 3.5km/h であるが、旋回区間を始めとする操舵操作により全区間の平均では 3km/h 以下となったものである。

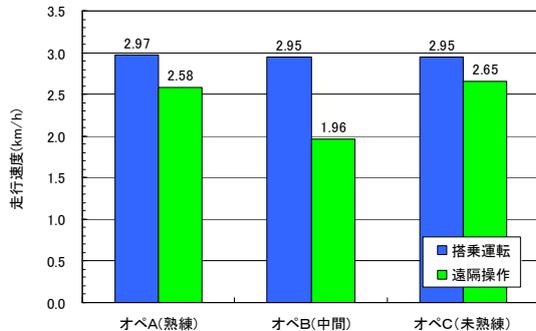


図-8 走行試験時の走行速度

表-5 走行試験時の走行速度および比率

オペレータ	搭乗運転	遠隔操作	遠隔/搭乗
A (熟練)	2.97 km/h	2.58 km/h	0.87
B (中間)	2.95 km/h	1.96 km/h	0.66
C (未熟練)	2.95 km/h	2.65 km/h	0.90

(2) 施工品質（操舵の安定性）

各試験毎の走行目標線からのズレ量の平均値および標準偏差を示したものが図-9 である。また、これよりオペレータ別に搭乗運転、遠隔操作それぞれの標準偏差の平均を求め、比較したものが表-6 である。標準偏差は走行目標線からのズレ量のバラツキの大きさ、すなわち操舵の安定性を表している。

これより、いずれのオペレータも搭乗運転に比べて遠隔操作の方がズレ量のバラツキが大きい（1.5~2.5 倍程度）ことがわかる。また、遠隔操作におけるオペレータによる差は、A, B, C の順でズレ量のバラツキが少なく、操舵の安定性は遠隔操作の経験量に比例している。

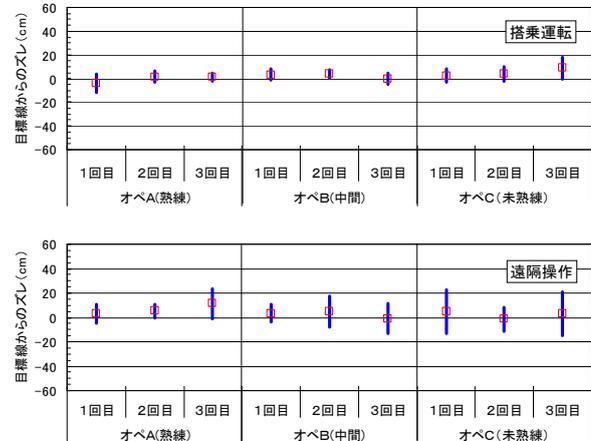


図-9 走行目標線からのズレ

表-6 操舵の安定性（標準偏差の平均値）

オペレータ	搭乗運転	遠隔操作
A (熟練)	5.5 cm	8.5 cm
B (中間)	4.2 cm	10.8 cm
C (未熟練)	6.8 cm	15.1 cm

(3) 技能習熟度の違い

遠隔操作による走行試験では、遠隔操作の経験量の違いは走行速度には表れなかったが、施工品質（操舵の安定性）は経験量に比例した結果となった。

3.4 遠隔操作時のオペレータの注視画面

遠隔操作により作業（走行）試験を行っているときに各オペレータが中央と左右の3台のモニタのどの画面を見て遠隔操作を行っていたかについても調査を行った。調査方法は遠隔操作室でオペレータを正面から撮影したビデオ映像をモニタ映像と同期させて録画し、これを読み取って各モニタを見ていた時間率を求めた。この例として掘削作業試験の掘削時および走行試験の旋回時のモニタ注視時間率を図-10 に示す。また、そのときのモニタ画面の例（掘削積込作業試験：オペ A, 走行試験：オペ C）を写真-3 に示した。

例示したのは一部であるが、全体を総合すると、オペレータ A はどれか1台のモニタ画面（走行試験以外は車載カメラ映像）を集中して見る傾向が強い。オペレータ B は最もよく見るモニタが中央

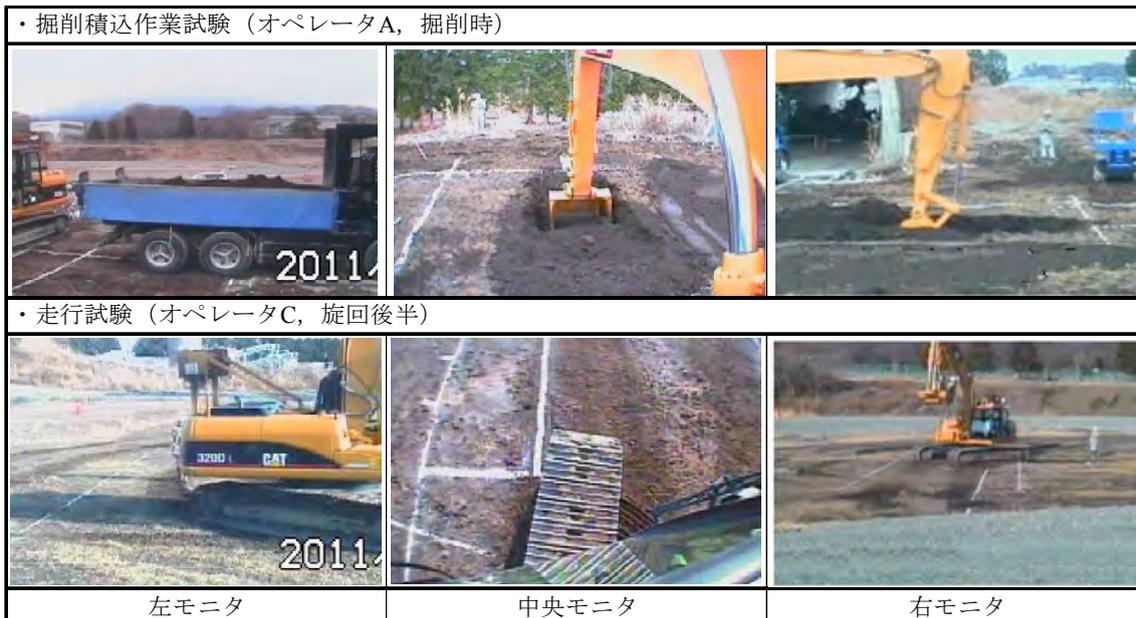


写真-3 遠隔操作時のモニタ画面の例

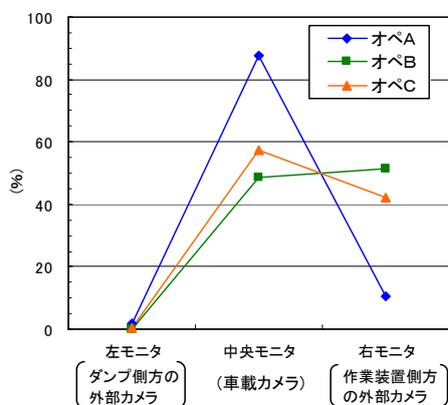


図-10 掘削積込作業試験時（掘削時）のモニタ注視率

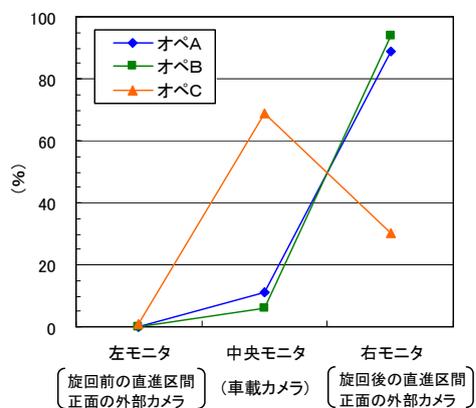


図-11 走行試験時（旋回後半）のモニタ注視率

モニタ（車載カメラ映像）ではなく、左右のモニタ（外部固定カメラ映像）である場合が比較的多く、その時々でモニタ画面を使い分けているとい

える。オペレータCは均し作業試験以外はどの場合も中央モニタ（車載カメラ映像）を見ている率が最も高かった。これは自車を運転席以外の方向から見る外部カメラの映像に慣れていない（有効に活用していない）ことが理由として考えられる。

5. おわりに

遠隔操作型バックホウの操作について、遠隔操作の経験の違いによる技能の差を明らかにすべく、模擬作業試験を行い、作業効率や施工品質について測定・分析した。その結果、作業効率は必ずしも経験の有無、年数に比例する結果とはならなかったが、施工品質については掘削積込作業、均し作業、走行のいずれの試験においても、遠隔操作の経験がない場合は熟練オペレータとは差があることがわかった。

この技能の差がモニタからの視覚情報の活用に習熟していないことに起因するものなのか、運転席の操作レバー類とは寸法もストロークも異なる遠隔操作器に慣れていないことによるものかは今回の試験からは判断できないが、今後、無人化施工の技能者を効率的に育成していくためには、視覚情報の的確な活用を含めた遠隔操作技能の習熟方法について検討することが必要になると思われる。

参考文献

- 1) 藤野・茂木：建設機械の遠隔操作時における操作者の視点，建設機械，47巻，9号，pp.28～33，2011年