

## 2.3. 無人化施工における通信遅延と通信周期が 施工効率に与える影響の分析と改善提案

株式会社 NTT ドコモ  
株式会社 NTT ドコモ  
株式会社 フジタ

○ 林 宏樹  
田村 隆幸  
三鬼 尚臣

### 1. はじめに

1990年に噴火した雲仙普賢岳の堆積土砂を除去する災害復旧として、1994年に建設機械を遠隔操作し施工を行う無人化施工が開始された。その後、無人化施工は火砕流、土石流、地すべり、崖崩れなどの災害復旧現場で行われており、更なる適応範囲の拡大が期待されている。しかしながら、無人化施工における施工効率は、通常の有人搭乗施工と比較し60%程度と低く、安全上無人化施工が不可欠な災害復旧現場や特殊で劣悪な作業環境での導入に留まっている。この施工効率を向上させ、システム導入のコストを抑えられれば、適応範囲の拡大に繋がると考えられ、非常に大きな意義があると考えられる。

本稿では、無人化施工の施工効率低下の要因を抽出するために行った実験について述べ、効率低下の大きな要因の1つである通信遅延/通信周期が効率低下に与える影響を計測した実験について紹介し、現状のラジコン遠隔操作油圧ショベルにおける操作遅延についてまとめ、改善手法として携帯電話網を利用した遠隔操作の提案を行う。

### 2. 無人化施工における課題

無人化施工にて一般的に利用されている遠隔操作システムは、図-1に示すようなものである。施工フィールド及び建設機械の車載カメラの映像を50GHz帯の簡易無線で伝送し、その映像を見ながらオペレータは、遠隔操作用コントローラを操作し、建設機械に対し429MHz帯の特定小電力無線を介して運転制御信号（操作コマンド）を送ることで、建設機械を遠隔操作する。

無人化施工における課題は、映像の質が悪い、

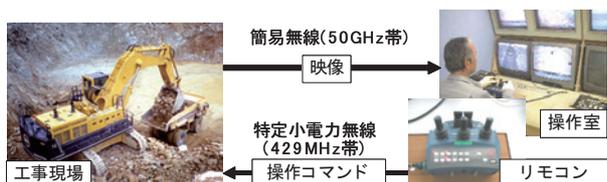


図-1 無人化施工遠隔操作システム

建設機械にかかっている力が分からないなどの、直接施工効率に関わるものと、建設機械の輸送コストがかかる、無線が干渉し建設機械が動かさないことがあるなどの工事全体の進捗やコストに関わるものと大きく2つに分類できると考えられる。文献<sup>1)</sup>や無人化施工のオペレータからのヒアリングなどから得られた無人化施工の課題を以下にまとめる。

#### (1) 施工効率に関わる課題

- ・映像の視野角が狭い、奥行き情報が分からない
- ・映像を見ることで目が疲れる
- ・建設機械にかかる力や傾きが分からない
- ・操作レバーの操作感が悪い
- ・操作の遅れがあり、操作しにくい

#### (2) 工事全体の進捗やコストに関わる課題

- ・遠隔操作対応建設機械の数が少なく、建設機械の輸送コストがかかる
- ・無人化施工のオペレータの数が少なく、オペレータの確保が難しい
- ・無線が干渉し、同時に動かせる建設機械の数が限られる
- ・150mを超える遠隔操作を行うためには無線中継器が必要<sup>2)</sup>となり、コストがかかる

以上のように、無人化施工における課題は大きく2つに分けられる。施工効率の向上に関して、一般的な無人化施工では、オペレータは遠隔地の情報として映像を頼りに建設機械を操作するため、課題解決の取り組みとしては、映像関連の数が多<sup>1)</sup>。ただし、施工効率低下の要因の抽出方法としては、オペレータへのヒアリングによるところが大きく、経験則に頼った課題抽出方法となっている。そこで、無人化施工での施工効率低下の要因を客観的観点から抽出するための実験を行った。

### 3. 施工効率低下の要因抽出予備実験

無人化施工での施工効率低下の要因を抽出するために普賢岳赤松谷川上流付近にて予備実験を行った。

### 3.1 効率低下要因抽出実験方法

効率低下の要因を抽出するために、油圧ショベル（キャタピラージャパン社製 320DL）を用いて一定の区画（5m×4m：深さ 1m）を掘削及び埋め戻し、それぞれに要した時間と実際に掘削・埋め戻しを行った土量を計測した。操作条件は以下の4パターンを行うものとした。

- ①通常の有人施工
- ②無人化施工
- ③目視での無人化施工
- ④搭乗リモコン操作する有人施工

搭乗リモコン操作する有人施工（リモコン搭乗）とは、図-2に示すように、油圧ショベルの搭乗席からリモコン操作機を用いて操作を行う方法である。

図-3に掘削範囲と油圧ショベルの位置関係を示す。オペレータは、適宜クローラを操作し油圧ショベルを移動させながら作業を行った。掘削範囲は5m×4m、深さ1mとし、掘削後、押し固めて掘削範囲の成型が終了した時点で掘削作業完了とした。埋め戻しは、直前に掘削した範囲に土を埋め戻し、埋め戻し後、押し固めて平らに成型が終了した時点で埋め戻し作業完了とした。掘削範囲をあらかじめ白線で土表面に記し、オペレータに分かるようにした。また、放土範囲は掘削範囲から約90度程度左方向に旋回したあたりとした。掘削作業については、掘削開始から掘削作業完了までの時間を計測し、作業完了後、掘削範囲の計測を行い、土量を計測した。埋め戻し作業については、埋め戻し開始から埋め戻し作業完了までの時間を



図-2 リモコン搭乗操作の様子

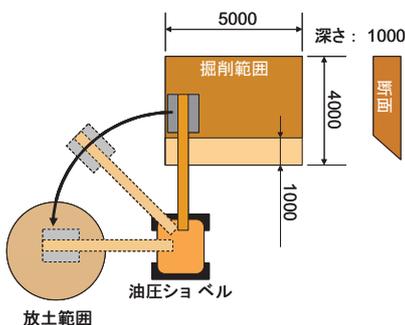


図-3 掘削範囲と油圧ショベルの位置関係

計測し、土量については、直前の掘削作業で掘削した土量とした。オペレータは、無人化施工歴6～13年の熟練オペレータ4名とした。

### 3.2 実験システム

実験システム構成図を図-4に示す。有人搭乗操作と特定小電力無線を介した遠隔操作での、ジョイスティック操作から各油圧シリンダの動作までの操作遅延時間を計測するために、油圧ショベルの搭乗席のジョイスティックの変位センサ、リモコン操作機のジョイスティック変位センサ及び、油圧シリンダの変位センサを設置した。なお、操作遅延の計測結果については、第5章にて紹介する。映像については、油圧ショベルキャブ上の車載カメラ1台と客観視用カメラ1台の映像を有線でオペレータ側に伝送し、1台の20インチCRTモニタに出力した。CRTモニタに表示する映像はオ

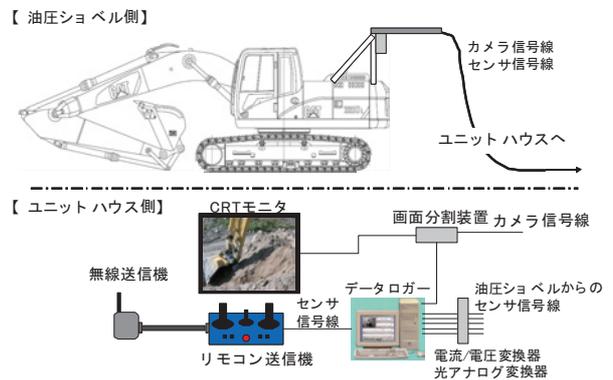


図-4 予備実験システム構成図

表-1 施工効率予備実験結果

	無人化施工歴	平均	オベ1	オベ2	オベ3	オベ4
			6年	10年	10年	13年
掘削	有人施工	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	無人化	0.61	0.61	0.57	0.85	0.40
	無人化目視	0.56	0.49	0.58	0.69	0.47
	リモコン搭乗	0.67	0.69	0.68	0.85	0.46
埋戻	有人施工	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	無人化	0.56	0.47	0.50	0.87	0.41
	無人化目視	0.53	0.62	0.37	0.61	0.51
	リモコン搭乗	0.55	0.69	0.47	0.61	0.42

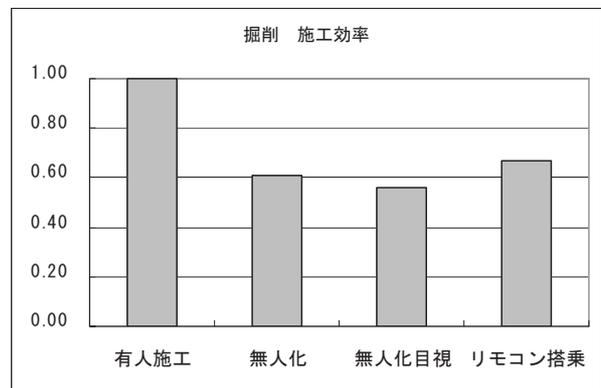


図-5 掘削作業における施工効率

オペレータが適宜ボタン操作で変更できるようにした。

### 3.3 実験結果

実験結果について、掘削及び埋め戻しの施工効率を表-1 に示す。また、各オペレータの掘削作業における施工効率の平均値の結果を図-5 に示す。効率については、土量を作業時間で割り、有人施工の効率を1とした値となっている。

結果を見ると、オペレータによって、施工方法の得意・不得意があり施工効率の傾向に多少バラつきが見られるが、有人施工と比較すると他の3パターンの操作方法では大幅に作業効率が低いことが分かる。さらに有人施工とリモコン搭乗との2つの施工方法は、両者とも油圧ショベルの搭乗席から操作しているため、視覚、傾きなどの体感可能な情報については同等であり、差異は「リモコン操作機を介して操作しているか否か」の1点だけである。有人施工とリモコン搭乗での作業効率を比較すると、30~40%程度リモコン搭乗での効率が低いことが分かる。よって、リモコン操作機を介した操作自体が施工効率の低下の大きな要因であることが分かる。

リモコン操作機を介した操作と通常の搭乗操作との大きな違いは、以下の2点であると考えられる。

- ・操作レバーの操作感が悪い
- ・操作の遅れがあり、操作しにくい

前者は、操作インターフェースに関する課題、後者は通信遅延や通信周期に関する課題である。今回の実験のオペレータは、無人化施工の熟練オペレータであり、リモコン操作機のジョイスティックによる油圧ショベルの操作には十分慣れていると考えられる。そのため、操作効率低下の大きな要因は、リモコン操作機を介することによる通信遅延や通信周期にあるのではないかと考えられる。

### 4. 通信遅延/通信周期と施工効率

効率低下の要因抽出予備実験の結果から、無人化施工における通信遅延及び通信周期が施工効率低下の大きな要因であると考えられる。そこで無人化施工において、通信遅延/通信周期がどの程度施工効率に影響を与えているかを検証するとともに、NTTドコモが提供する第3世代携帯電話サービスの高速パケット通信規格であるHSDPA (High Speed Downlink Packet Access) を利用した遠隔操作がどの程度の施工効率を得られるかを検証するために施工効率比較実験を行った。なお本実験はキャタピラージャパン株式会社の協力のもと、キャタピラージャパン秩父デモセンターにて行われた。

#### 4.1 施工効率比較実験方法

施工効率を比較するために、効率低下要因抽出

予備実験同様に、油圧ショベル（キャタピラージャパン社製 320DL）を用いて一定の区画（5m×4m：深さ1m）を掘削し、掘削にかかった時間を計測する実験を行った。操作条件は以下の7パターンで効率比較実験を行った。

- ①通常の有人施工
- ②特定小電力無線での無人化施工
- ③HSDPAでの無人化施工
- ④通信周期10ms、通信遅延0msでの無人化施工
- ⑤通信周期10ms、通信遅延100msでの無人化施工
- ⑥通信周期10ms、通信遅延350msでの無人化施工
- ⑦通信周期80ms、通信遅延100msでの無人化施工

通信遅延は0、100、350msの3パターンを、通信周期は10、80msの2パターンを比較した。通信周期とは、リモコン操作機から、重機側の操作データ受信部までの通信部分の遅延時間である。また、通信遅延とは、リモコン送信機から重機側に送信する操作コマンドのデータ送信間隔である。なお特定小電力無線の通信遅延は実測片道100ms程度、通信周期は80ms（仕様）。HSDPAの通信遅延は実測片道平均（リモコン送信機から油圧ショベル側ユニットまでの片道通信遅延）120ms程度、通信周期は10msに設定した。HSDPAの通信遅延については、キャタピラージャパン秩父デモセンター（埼玉県秩父市）における実験当時の環境での値である。HSDPAでの通信遅延は、場所、計測時のネットワークのトラフィックの状態、天気など様々な要因で変化するため、120msという値は、実験当時の計測値であることを注意されたい。掘削範囲は図-3と同様で、掘削条件、作業完了条件も効率低下要因抽出予備実験と同様とした。掘削開始から作業完了までの時間を計測し、作業完了後、掘削範囲の計測を行い、土量を計算した。

オペレータは無人化施工において主に油圧ショベルを操作している無人化施工歴7年の熟練オペレータ1名とした。

#### 4.2 実験システム構成

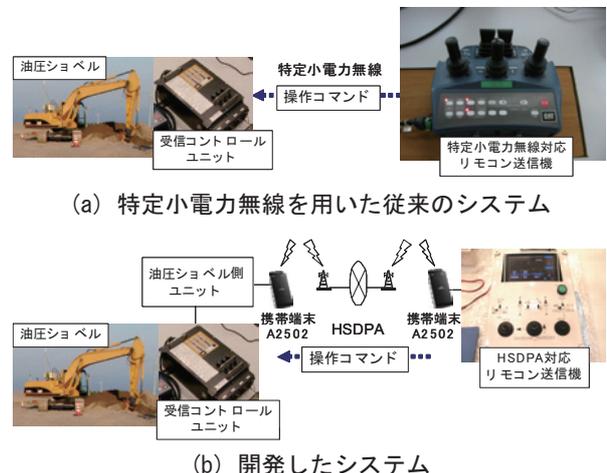


図-6 遠隔操作システム構成比較

実験を行う上で、通信遅延を擬似的に付加が可能及び、HSDPA を介して操作を行えるリモコン送信機が必要となるため、独自にリモコン操作機を開発した。従来のリモコン送信機及び開発したリモコン送信機を図-6 に示す。開発した HSDPA 対応リモコン送信機と油圧ショベル側ユニットの間は、HSDPA などの公衆無線網、無線 LAN、LAN ケーブルでの有線接続などが利用可能である。通信周期は、リモコン送信機側で最小10ms から10ms 間隔で設定可能である。

施工効率比較実験の実験システム構成図を図-7 に示す。通信遅延の影響を比較するため、油圧ショベルの操作コマンドを、LAN ケーブルを介して有線で送信し、間を経由するネットワークエミュレータにて通信遅延を付加した。付加した通信遅延は、それぞれ揺らぎのない固定値とした。映像については、油圧ショベルキャブ上の車載カメラ1台と客観視用カメラ1台の映像を有線でオペレータ側に伝送し、それぞれを20インチカラー液晶ディスプレイに表示した。特定小電力無線を用いた操作条件では、キャタピラージャパン社純正の遠隔操作リモコン送信機を、通信遅延/通信周期を設定した4つの操作条件及びHSDPAを用いた操作条件では開発した HSDPA 対応リモコン送信機を用いて実験を行った。

### 4.3 実験結果

実験結果について各操作条件での施工効率、土量、作業時間を表-2 に示す。また、通信遅延を比較した施工効率のグラフを図-8 に、通信周期を比較した施工効率のグラフを図-9 に示す。

通信遅延を比較した施工効率の結果を見ると、通信遅延 0ms で効率 66%、通信遅延 100ms で効率 60%、通信遅延 350ms で効率 44%と、通信遅延が小さければ小さいほど、施工効率が高いことが分かる。従来の特定小電力無線を介した無人化施工での効率 57%と、通信遅延 0ms での効率 66%とを比較しても 10%程度の効率向上があり、通信遅延または操作遅延が施工効率に与えている影響が大きいことが伺える。

通信周期を比較した施工効率の結果を見ると、通信周期 10ms で効率 60%、通信周期 80ms で効率 54%と、通信周期が短ければ短いほど、施工効率が高いことが分かる。

また、HSDPA を介した操作条件では、特定小電力無線を介した操作条件とほぼ同等の施工効率が見られており、現在サービスが行われている HSDPA の公衆無線網を利用しても、従来の無人化施工と遜色ない作業が行える可能性があることが分かった。

## 5. ラジコン遠隔操作における操作遅延

効率比較実験により、油圧ショベルの遠隔操作の操作効率には、通信遅延及び通信周期が影響を与えていることが分かった。ここでは、通信遅延を含めた操作遅延が、どの部分でどの程度発生しているのか計測を行った結果について記す。なお操作遅延とは、オペレータがジョイスティック操作を行ってから油圧ショベルの各油圧シリンダが

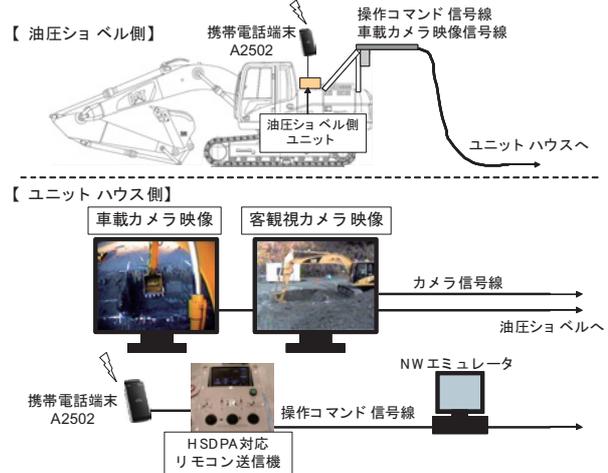


図-7 効率比較実験システム構成図

表-2 効率比較実験結果

	有人施工	無人化施工					
		周期80ms 特小	周期10ms HSDPA	周期10ms 遅延0ms	周期10ms 遅延100ms	周期10ms 遅延350ms	周期80ms 遅延100ms
施工効率	1	0.57	0.57	0.66	0.60	0.44	0.54
時間(分:秒)	07:14	12:45	12:50	11:07	11:54	13:51	13:38
土量 立米	19.44	19.44	19.58	19.86	19.17	16.41	19.72

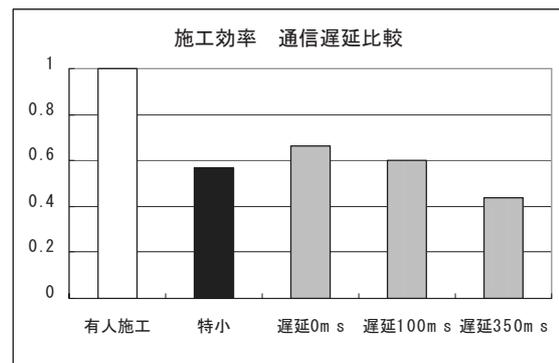


図-8 施工効率と通信遅延

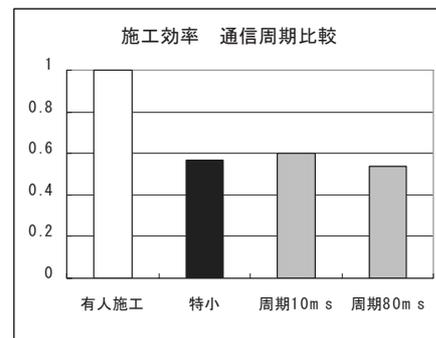


図-9 施工効率と通信周期

動作し始めるまでの時間とする。

### 5.1 ジョイスティック操作—油圧シリンダ動作

まず、通常の有人搭乗操作と、従来の特定小電力無線を介した遠隔操作における操作遅延を計測した。第3章に記載した予備実験の際に記録したジョイスティック操作と油圧シリンダの変位データより操作遅延を算出した。ブーム、アーム、バケットの各操作について、それぞれ10回分のデータを計測した結果を表-3に示す。通常の有人搭乗操作の場合は、油圧ショベルキャブ内のジョイスティック操作と各油圧シリンダの動作とを、特定小電力無線を介した遠隔操作の場合は、リモコン操作機のジョイスティック操作と各油圧シリンダの動作とを比較し、操作遅延を算出した。

搭乗操作の場合とラジコン遠隔操作の場合を比較すると、搭乗操作の場合の操作遅延は平均282ms、ラジコン遠隔操作の場合の操作遅延は平均507msとラジコン遠隔操作の場合には、225ms操作遅延が大きくなっていることが分かる。

この225msの原因として考えられるものは、ラジコン操作の際の特定小電力無線の通信遅延及び油圧シリンダへの油圧の流量を制御する電磁弁の動作の処理遅延の大きく2つである。今回計測に使用したキャタピラージャパン社製油圧ショベル320DLでは、搭乗操作の場合には、ジョイスティックを操作することで直接機械的に弁の開閉を行っており、ラジコン遠隔操作の際は、電磁弁を電気的に開閉することで油の流量を制御している。

### 5.2 ジョイスティック操作—電磁弁信号出力

ラジコン遠隔操作における、通信遅延時間と電磁弁制御の処理遅延時間とを計測するために、計測実験をおこなった。実験システム構成図を図-10に示す。計測方法は、リモコン操作機のジョイスティック操作信号（右ジョイスティック左右動作：バケット排土/掘削動作）と油圧ショベル側受信コントロールユニットからの制御用出力信号とを時間同期させながら計測し、ジョイスティック操作から制御用信号出力までの時間を計測した。計測を行ったのは、

- ①特定小電力無線
  - ②HSDPA 対応リモコン送信機で HSDPA 接続
  - ③HSDPA 対応リモコン送信機で有線接続（通信遅延なし）
- の3つの条件である。

計測結果を表-4に示す。結果は、各10回分の計測データを平均したものである。本実験は、NTTドコモ R&D センタ（神奈川県横須賀市）にて行ったが、実験時の環境における HSDPA 接続の片道の通信遅延は平均約95msであった。

結果をみると、実験時の環境では、特定小電力無線と HSDPA 接続では、ジョイスティック操作か

ら受信コントローラまでの制御信号出力までの時間がそれぞれ229msと223msとなっており、ほぼ同等の結果であった。また、有線接続で通信遅延なしの場合、108msであり、これは受信コントロールユニット内での電磁弁制御の処理遅延が約100ms程度であることを示している。実験当時の HSDPA での通信遅延が約100msであったことから、特定小電力無線での通信遅延も約100msであったと推測できる。

### 5.3 操作遅延まとめ

以上の結果から、図-11に有人搭乗操作とラジコン遠隔操作での操作遅延について示す。

有人搭乗操作の場合、ジョイスティック操作から、各油圧シリンダの動作まで約300msである。ラジコン遠隔操作の場合、リモコン操作機ジョイスティック操作から、各油圧シリンダ動作まで約500msである。特定小電力無線を利用したラジコ

表-3 搭乗操作/ラジコン操作における操作遅延

		ジョイスティック操作から油圧シリンダ動作までの時間 [ms]
通常搭乗操作	ブーム	288
	アーム	341
	バケット	218
	平均	<b>282</b>
ラジコン操作	ブーム	655
	アーム	419
	バケット	447
	平均	<b>507</b>



図-10 通信遅延計測実験システム構成図

表-4 通信遅延計測実験結果

	ジョイスティック操作から制御用信号出力までの時間 [ms]
特定小電力無線	229
HSDPA接続	223
有線（遅延なし）	108

ン遠隔操作の場合、操作遅延約 500ms の内訳は、通信遅延:約 100ms、受信コントローラの内部処理遅延:約 100ms、油圧動作遅延:約 300ms である。

## 6. 操作遅延/周期の改善方法

無人化施工における施工効率低下の大きな原因の 1 つである操作遅延について計測した結果、ラジコン遠隔操作では、有人搭乗操作と比較し、200ms 程度操作遅延が大きいことが分かった。この 200ms を如何に少なくし、全体の操作遅延を有人搭乗操作の操作遅延相当の 300ms に近づけるかが、施工効率向上に向けた課題となる。

弁が開閉してから、油の流量が変化し油圧シリンダが動作するまでの油圧動作遅延 300ms は、油圧系のアクチュエータを使用すると必ず発生してしまう動作遅延であるため、この時間を減らすには、別のアクチュエータに変更するか、新しい油圧アクチュエータに変更しなければ、改善は難しいと考えられる。

油圧ショベル側の受信コントロールユニットでの内部処理遅延 100ms は、内部でどのような処理が行われているのか不明であるため、改善は可能であると推測されるが、重機メーカーの協力が必要



図-11 搭乗操作及びラジコン操作における操作遅延

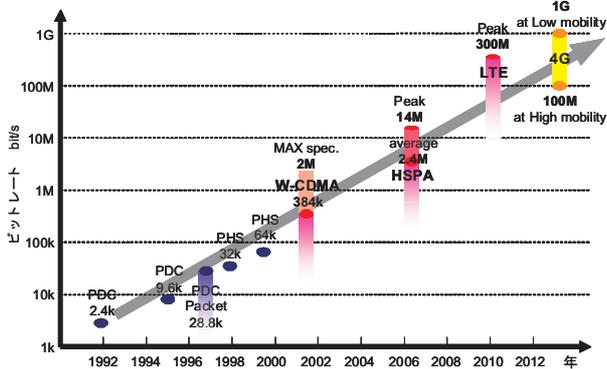


図-12 携帯電話網の発展 (文献 7) より再構成

な部分である。

通信遅延については、現状の特定小電力無線では、約 100ms であることが分かった。操作室から施工フィールドまでの距離が長く、無線中継局が必要な場合は、更に通信遅延が大きいと推測される。そこで、我々としては、携帯電話網を利用することを改善案として提案したい。HSDPA を介した遠隔操作での施工効率は、特定小電力無線を介した遠隔操作とほぼ同等であることを確認している (表-2 参照)。また図-12 に示すように<sup>3)</sup>、NTTドコモでは、今後も LTE(Long Term Evolution)や 4G と研究開発を進めており、通信遅延は更に短くなる予定である。さらに、通信周期については、HSDPA における携帯端末と無線基地局との間のパケット転送間隔である TTI(Transmission Time Interval)は、下り 2ms、上り 10ms であるが、LTE、4G と更に短くなる予定で、開発したリモコン送信機では通信周期を 10ms としているが、更なる通信周期の向上が見込める。

## 7. まとめ

本稿では、無人化施工の施工効率低下の大きな要因の 1 つである、通信遅延/通信周期が効率低下に与える影響を分析し、遠隔操縦における操作遅延を計測し、改善方法として携帯電話網を介した遠隔操作を提案した。HSDPA を介した遠隔操作についての詳細は、文献 4) を参照されたい。ラジコン遠隔操作の操作遅延について、通信遅延に対しては、携帯電話網を利用することにより改善が見込めるものの、内部処理遅延及び油圧動作遅延については、重機メーカーの協力なしには改善することは難しい。今後、無人化施工の効率向上及び適応領域拡大に向け、国交省や重機メーカーなどに理解を求め協力し取組みたいと考えている。

本研究を進めるにあたり、キャタピラー・ジャパン株式会社様には大変お世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 柳沢雄二, 山元弘, 邵輝, 境田右軌, 野末晃, 山口崇: 作業機械の遠隔操作におけるマンマシンインターフェイスに関する研究, 第11回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.253-262, 2008.
- 2) 財団法人 先端建設技術センター: 緊急時の無人化施工ガイドブック, 大成出版社, 2001.
- 3) 大矢智之, 長敬三, 樽橋祥一: 将来の高速大容量通信に向けた無線要素技術, NTTドコモテクニカルジャーナル, Vol.16 No.2, pp.24-30, 2008.
- 4) 林宏樹, 山本新吾, 三鬼尚臣: 公衆無線網を用いた油圧ショベル遠隔操作, 建設の施工企画, 2009年3月号 No.709, pp.69-75, 2009.