

無人化施工技術における生産性向上に向けた取組み

梶田洋規・伊藤禎宣・橋本 毅

1. はじめに

近年、建設現場ではMC（マシンコントロール）やMG（マシンガイダンス）といったICT（情報通信技術）を利用した「情報化施工」が普及してきており、大規模或いは複雑な線形の現場などに導入することで施工効率向上・品質確保・安全性確保などの高い効果を得ている。

一方で、建設機械に無線装置やカメラ・画像伝送装置などのICT機器を搭載した「無人化施工」は、災害等の危険な現場においてオペレータが安全な場所から遠隔操縦することで二次災害の危険性をなくすものである。安全確保は達成しているが、ICT機器を搭載しながらも、ICT機器を搭載しない搭乗式の通常建設機械と比べ、施工効率が非常に悪い状況である。これは、搭載しているICT機器が生産性向上・品質確保を目的とする機器ではなく、安全確保を目的とする機器のためである。しかしながら、災害現場では無人化施工用機械や熟練オペレータの早期確保に苦慮しており、また、早期の応急復旧が望まれることから、高い施工効率も望まれる。生産性向上に寄与する情報化施工搭載のICT機器が、3次元設計データを搭載することで、丁張レスでの掘削の位置出しや仕上げの場面、また、品質確保という点で効果を発揮することに鑑みると、臨機応変な対応を求められる災害現場においては、既存のMG・MCの単なる導入では無人化施工の施工効率が大きく向上することは期待できない。

国立研究開発法人 土木研究所では、情報化施工や無人化施工について、様々な条件による実験・計測を行うことで、導入効果の定量的な把握、その効果の向上や問題の改善に資する研究を行ってきたところである。本稿では、これまでの実験・計測結果を鑑みつつ、無人化施工の生産性向上に向け、今後の研究・開発で取り組む方向について展望するものである。

2. 無人化施工の課題

無人化施工の作業効率は、通常オペレータが運転席に座って行う搭乗施工と比較して非常に低い。そこで、改善に向け現状を把握することを目的に、実験・計測により定量的な数値を得た。

2.1 無人化施工のサイクルタイム

(1) 実験概要

無人化施工の経験がないオペレータ10人により、遠隔操縦式の油圧ショベル（20t級）を用いて、「走行（往路）→土砂掘削→旋回→土砂積込→走行（復路）」といった一般的な土工の作業形態の動作を行い時間計測をした（図-1～図-3）。

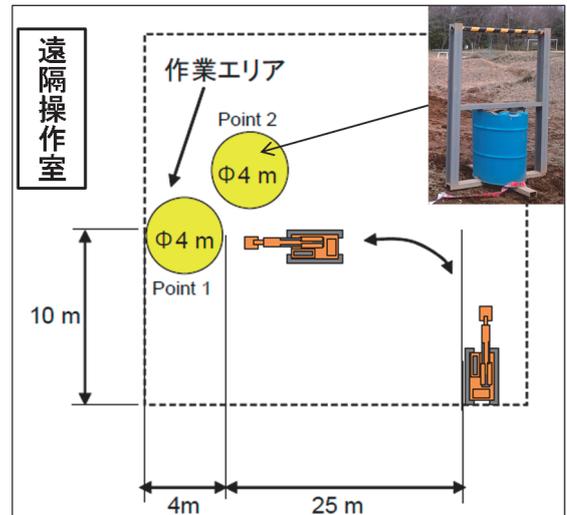


図-1 無人化施工の実験における位置関係



図-2 モニタ映像を見ての遠隔操作状況

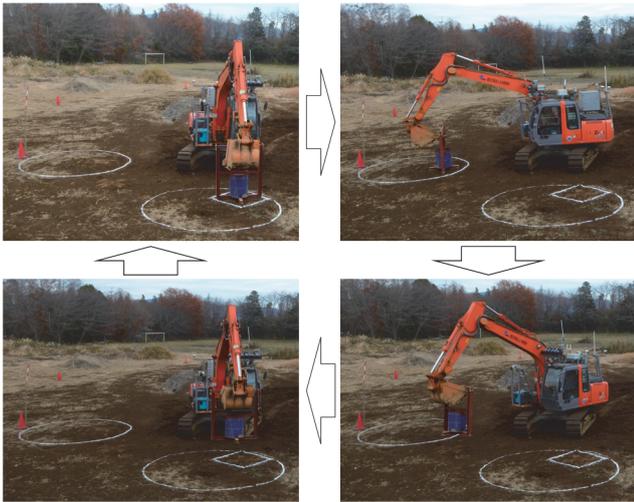


図-3 実験における動作パターン（走行を除く）

なお、「掘削」に関しては土砂の状態に影響されると再現性が確保されなくなることから、掘削に模してドラム缶で作成した作業対象物をバケットで引っ掛けることとした。通常の掘削作業では「土砂掘削→旋回→土砂積込（放土）」を繰り返すところを、本実験では「Point1で作業対象物を把持→旋回→Point2で降ろす→Point2で作業対象物を把持→旋回→Point1で降ろす」とした。

(2) 実験結果

上記の一連の作業を行い時間計測した結果、図-4の通り、人が運転席に座って直接操作する搭乗操作に比べ、無線による遠隔操作は約2倍の時間を要した。

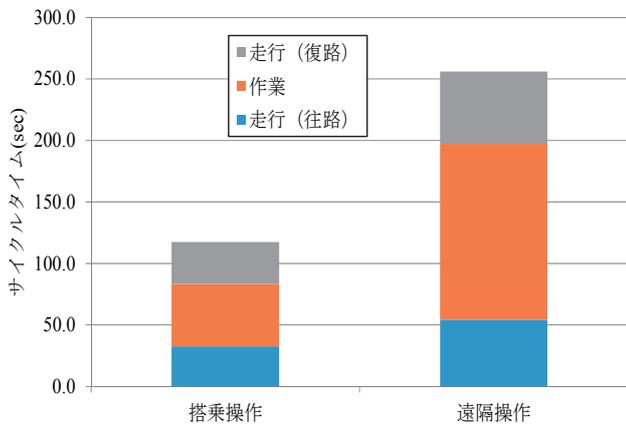


図-4 無人化施工の施工効率(10人の作業時間の平均値)

作業毎に見ると、操作が簡単な「走行」より、操作が複雑な「作業」の方が単位作業時間の増加度合いが大きい。実現場での施工を考えると「作業」の繰り返しが多くなるため、実現場では全体

の効率は更に悪くなると考えられる。

2.2 通信遅延による操作への影響

(1) 実験概要

無人化施工の効率が低い要因の1つに、遠隔操作モニタの映像表示の遅延時間があげられる。この遅延は、アナログ画像信号からデジタル画像信号への変換（A/D変換）や無線伝送といった処理によって生じる。その遅延時間を人為的に発生・調整し、遅延時間の長さによる影響を調査した。遅延時間は、様々な通信環境を想定して表-1の通り設定し、2.1と同じ作業形態パターンを5回行った。なお、2.1の実験は遅延時間300msレベルである。

表-1 映像通信遅延の設定

遅延時間	遅延のイメージ
0ms	建設機械の前方から対面目視
70ms	カメラとモニタの直結
300ms	伝送容量の大きい無線LAN環境
700ms	伝送容量の小さい無線LAN環境
1,000ms	公共BB等の無線通信環境
2,000ms	人工衛星経由の通信

(2) 実験結果

遅延2,000msではバラツキ（個人差）は大きいものの、総じて、遅延時間に比例して作業時間のサイクルタイムが増加している（図-5）。

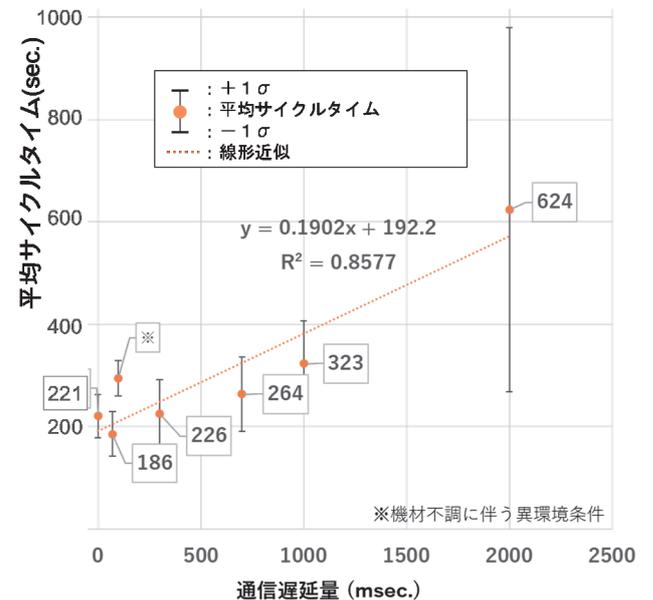


図-5 通信遅延と作業サイクルタイムの関係

なお、遅延0msのサイクルタイムが遅延70msより長いのは、建設機械の前方向から向かって見ることによって左右逆の操作になるためと推察される。

作業内容を図-6の通り細かく分割して、各作業内容別に遅延時間の影響度を整理したものを図-7に示す。

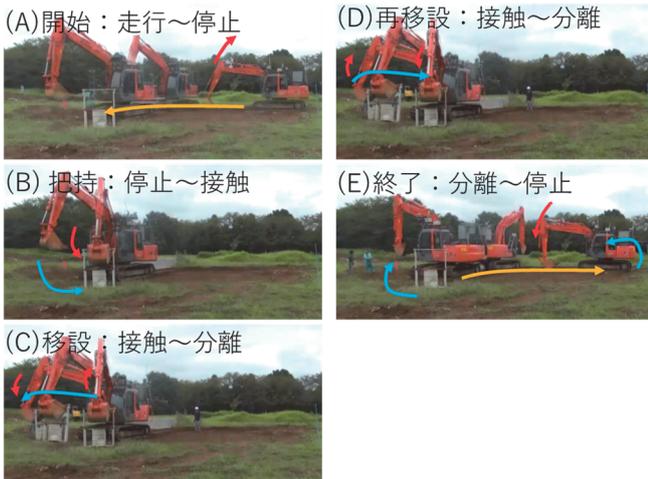


図-6 作業内容の分割

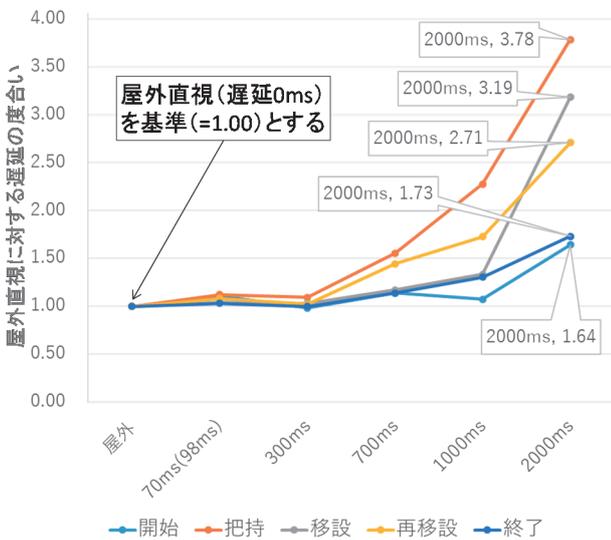


図-7 作業内容別の遅延時間の影響度合い

300msまでの遅延時間であれば問題ないが、それを超えると遅延時間に比例して操作時間が長くなる。また、操作が簡単な「移動（開始、終了）」では遅延時間の影響が比較的小さく、操作が複雑な「把持」などでは遅延によって操作時間が大きく増えてしまう。

図-8は、オペレータに遅延時間の影響度合いについて7段階でアンケート調査した結果を最大値

を1として正規化したものである。図-7と同様に、300msを超えると影響度合いを強く感じている結果となっており、感覚的にも図-7の影響度合いと同様の傾向となっている。図-8では遅延時間が300msまでであっても影響度合いが微増する傾向があるが、図-7ではそのような傾向は現れておらず、感覚的に影響を少し感じながらも受容していることが伺える。

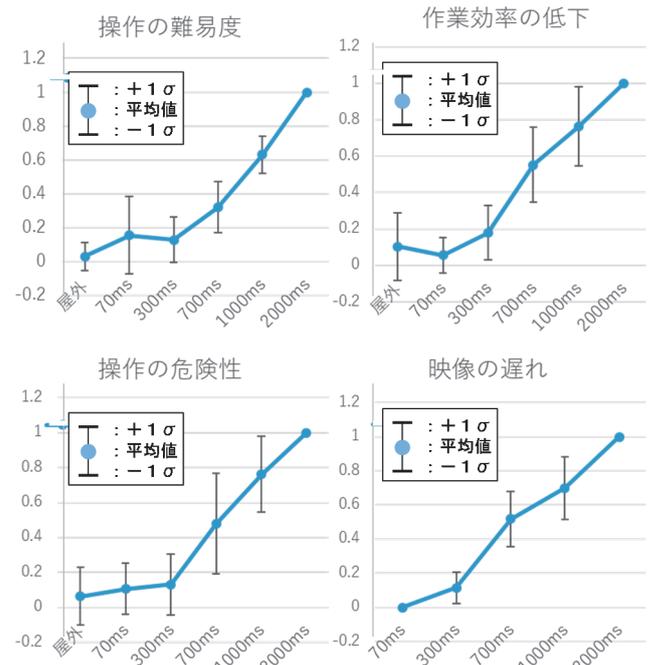


図-8 遅延時間に対するアンケート結果

遅延状況下での操作レバーの操作状況を、モーションキャプチャ装置を使って計測した。図-9は、遅延70msと遅延2,000msとした時の操縦レバー（左・右）の移動軌跡である。

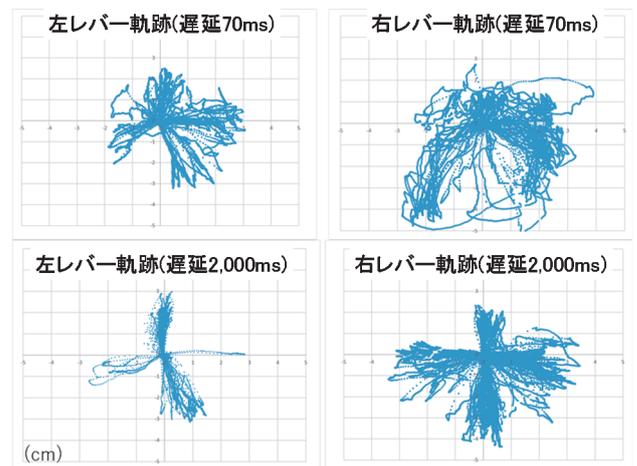


図-9 遅延時間による操縦桿操作の違い

遅延2,000msでは操縦レバーは十字に動いているが、遅延70msでは十字以外での動きが多い。つまり、遅延70msではブーム・アーム・バケットを複合的に動かしていることが伺える。

操作レバーの操作方式（JIS方式）は図-10の通りであり、図-9において遅延70msでは右レバーが十字以外の方向として、左下方向や右下方向へ動いており、ブーム上げとバケット掘削やバケット解放を行うという同時操作による複合動作が高い頻度で行われていることが伺える。



図-10 操作レバーの操作方式（JIS方式）

2.3 操作環境（視野と操作レバー）の影響

(1) 実験概要

一般的な無人化施工の操作環境は、図-11の通り、人間の視野より非常に狭い画角のモニタを見ながらジョイスティック型操作レバーで操作するものである。これは、オペレータが慣れている搭乗式の建設機械での搭乗操作と環境が異なることから、操作性の低下を招く要因と考えられる。



図-11 一般的な無人化施工の操作環境

そこで、通常の搭乗操作の環境に近付けるべく、図-12の通り、人間の視野角をカバーするように配置したモニタ画面（+対応する複数のカメラ）で映像を見ながら、搭乗式の油圧ショベルの運転席型操作レバーを操作する操作環境を構築し、一般的な無人化施工の操作環境との比較を行った²⁾。



図-12 搭乗型に模した無人化施工の操作環境

(2) 実験結果

図-13の通り、搭乗操作に比べ一般的な遠隔操作の環境（改善前）におけるサイクルタイムは2倍以上であるが、図-12の視野角と運転席の環境改善によりサイクルタイムが約2割も改善できた。しかし、搭乗操作に対して未だ1.6倍と大きな開きがあり、より一層の改善が望まれる。

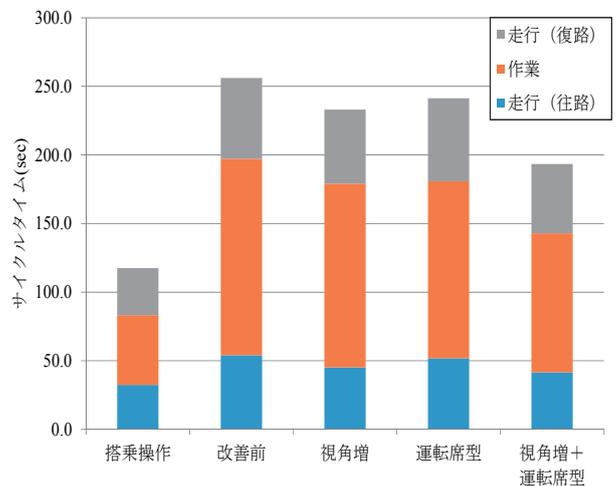


図-13 操作環境によるサイクルタイムへの影響

3. 無人化施工の生産性向上に向けて

無人化施工では、施工効率の低下に大きな影響があると思われる要因に対策を施したとしても、搭乗操作の1.6倍のサイクルタイムであった。そのため、今後も影響要因の分析とその対処法を研究していく予定である。

しかし、低下要因の対策として、搭乗操作に近付けるという視点では、搭乗操作の効率に近付きはするものの、高額なICT機器を搭載しながら、それを越えることは難しい。

無人化施工は、コストは二の次の災害時の利用が想定されているものの、必要数の特殊な機材と特殊技能を持つオペレータを災害発生後に至急手配して被災地で運用するよりも、より施工能力が高く操縦が容易なことで、少ない台数と特殊技能を要しないオペレータで施工が可能なが望まれる。

以下に、ICT機器の効果を活かすことによって、無人化施工における生産性や運用性を向上させる可能性がある観点について言及する。

3.1 非熟練オペレータの支援機能

建設機械にICT機器を搭載することで施工効率を上げている情報化施工の導入効果の1つとして、非熟練オペレータの施工能力を熟練オペレータに近付けることが挙げられる。

通常の工事で考えてみると、熟練オペレータで体制を組むことが出来る場合であっても、施工計画、定常的に必要な台数分は熟練オペレータを確保して運用し、突発的に必要となるものを非熟練オペレータ対応型の建設機械で施工できれば、貴重な熟練オペレータの手配が楽になる。

災害現場の緊急時を考慮すると、遠隔操作の非熟練オペレータで体制を組むことができると、初動体制で無人化施工の導入がはっきりしない時点でもオペレータの手配の負担が減る。

なお、土木研究所におけるICT機器による非熟練オペレータに対する効果把握の実験としては、無人化施工で主力となる油圧ショベル等を対象としたものではないが、情報化施工機械での検証実験を2015年度に実施しているので、参考までに以下に報告する。

衛星測位 (GNSS) やレーザ測位を利用してブレード高さを自動制御し、計画した盛土高に整正

するMC (マシンコントロール) 機能を搭載したグレーダ(図-14)は、非熟練者に有効だということは定性的に言われていることであり、その効果の度合いを計測し定量的な数値を得た。



図-14 MC施工の効果の計測状況

(1) 実験概要

MCグレーダについて、MC機能の有無によって施工時間 (施工効率) と出来形のバラツキ (施工精度) に差が生じるかを確認するための計測を行った。グレーダのオペレータは、ICTを搭載しない通常のグレーダの運転の熟練者2名と非熟練者3名とした³⁾。

(2) 実験結果

作業時間を図-15に示す。熟練者についてはMC施工により従来施工よりも作業時間が平均で9.2%短縮するという効果があるものの、個人で見るとAさんについては3.1%短縮のみでほとんど効果が認められない。非熟練者では作業時間が平均で45.9%短縮しており、個人を見ても全員で大きな効果が見られる。

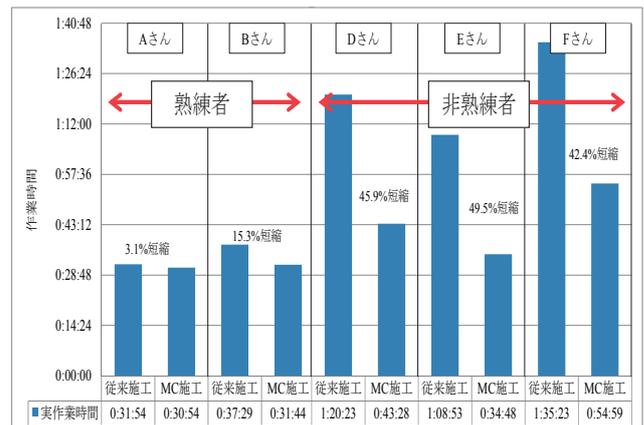


図-15 熟練度によるMC施工の効果度合い(作業時間)

施工精度（出来形のバラツキ）を図-16に示す。熟練者においても平均で21.5%改善と効果が見られ、非熟練者では平均で53.2%改善と非常に大きな効果が見られる。

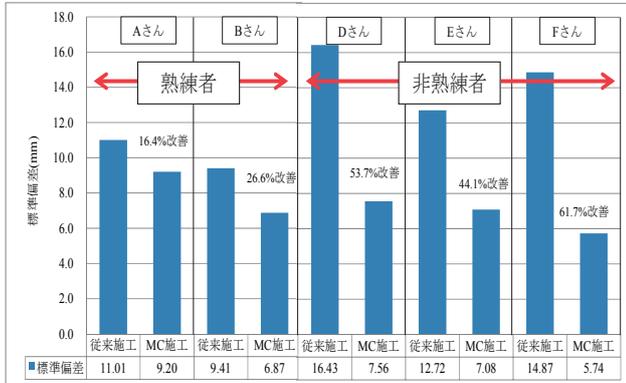


図-16 熟練度によるMC施工の効果度合い(施工精度)

以上の通り、MC導入の効果は、熟練オペレータに対しては小さいが、非熟練オペレータに対しては大きい。熟練オペレータが高齢化・減少し、オペレータの手配が懸念される中、ICT導入は有効な対策の1つと考えられる。

3.2 複合動作の自動化・支援機能

通信遅延による操作への影響の実験において、複合動作を行えないことがサイクルタイム低下の一因であることが示唆された。つまり、効果的に複合動作を行える自動化や支援機能を具備できれば、サイクルタイムの向上につながる。油圧ショベルには、設定した勾配で切り土を行うようにブーム・アーム・バケットを制御する機能を有したものもある。災害復旧用の無人化施工機械として、通常施工の情報化施工よりコストをかけても高効率に資する機器を搭載可能なこと、通常施工でレンタルされる油圧ショベルほど様々な現場での多様な作業を求める必要がないこと、通常施工ほど厳格な施工管理を求めないこと等の

点から、通常施工では実用レベルに満たない複合動作であっても無人化施工で行える可能性がある。

無人化施工でより多機能なものが搭載され実務の中で改良されていけば、情報化施工にも搭載されることが展望できる。

3.3 操作環境

通常操作の運転環境に近い視覚情報を与えることで、サイクルタイムが向上する効果を確認できた。更に音や振動などの情報を与えたり、その与え方でより向上することが考えられる。

逆に、非熟練オペレータという視点で見ると、過度な情報を与えると理解・判断に時間を要する可能性があることから、オペレータの熟練度に応じて与える情報を選定することが考えられる。

4. まとめ

無人化施工（遠隔操作）の施工効率低下の要因とその影響度、その対応策と効果を示したが、未だ改善に向け研究すべき点は大きい。今後も、低下要因の分析・改善の検討を行うと共に、熟練オペレータ不足を踏まえ非熟練オペレータを対象として効率化を図ることで調達を容易にするといった従来と違う運用条件にも着眼し、無人化施工の生産性向上に向け研究を行う所存である。

参考文献

- 1) 伊藤慎宣、藤野健一、安藤広志：映像通信遅延が建機の遠隔操作性に与える影響のモデルタスクによる評価、第16回 建設ロボットシンポジウム論文集、2016
- 2) 茂木正晴、橋本毅、梶田洋規：操縦装置と画像システムによる油圧ショベル遠隔操作の作業効率改善、土木技術資料、第58巻、第9号、pp.18~21、2016
- 3) 橋本毅、田中洋一、藤野健一：MC導入による施工時間・出来形への効果について、第16回 建設ロボットシンポジウム論文集、2016

梶田洋規



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 首席研究員
Hiroki KAJITA

伊藤慎宣



情報通信研究機構ビッグデータ利活用研究室主任研究員、知識科学博士
Dr. Sadanori ITO

橋本 毅



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員、工学博士
Dr. Takeshi HASHIMOTO