

## 建設機械等の遠隔施工と電波利用

久武 経夫・中里 邦子

火山噴火、地震、津波、原子力プラント事故等の大災害が発生し、人間が立入れない状況となった場合に、安全な場所から遠隔操作を行える作業機械や自律的に動き廻れるロボットが求められている。

東日本大震災に於いては、冷却用の注水や瓦礫処理に遠隔操作で注水を行える放水車（消防車、コンクリートポンプ車）やラジコン建機が出動した。原子力プラント内の調査や水中での被災者の探索等には国内外のロボットが活躍した。但し、想定外の規模の災害に対し、ラジコン建機やロボットの初動が期待に応える素早さであったとは言い難い。注水、瓦礫除去、調査に多くの機械が納入されたため、電波の取合いも迅速、機械の同時投入の妨げとなった。

本稿では、大災害に備える電波システムやロボット開発のあり方について、開発事例を含めた検証を行った。

キーワード：災害、建設機械、ロボット、電波、無線 LAN

### 1. はじめに

建設機械の遠隔操縦（ラジコン建機）は70年前、1940年初頭から始まっている。以来70年の当初の50年間は、建機はオペレータから数十m程度の目視できる範囲での遠隔操縦で、製鉄所の高炉近傍の灼熱空間での鉱滓処理、水中作業等で採用されてきた。表—1に、産業機械の遠隔操縦の事例を示す。海外で活躍している地雷処理等も遠隔操縦建機の恒常的な活躍の場である。

1993年、火山活動が終焉しない中に始まった雲仙普賢岳噴火の復興工事に採用された「無人化施工」では、施工現場に作業者を入れないために全作業をラジコン機械で実施している。国土交通省の方針で、噴火が終焉した後もオペレータが搭乗しない無人建機での

復興工事を継承している。現在までに100を超える工事が発注されているが、国土交通省は、施工者には都度新しい工夫を求め技術の涵養を図ってきた。

普賢岳で培われた建機の遠隔操縦技術が、富士山、白山、雲川等、崩壊性山地での施工、有珠山、三宅等災害復旧、中越等災害救援出動で活用された。一般の土木工事に於いても、オペレータの苦渋回避や安全確保を目的とした「無人化施工」も採用されている。転圧機械、ダンプトラック等での自動運転の試みも行われている。これら機械の自律化、ロボット化の展開と併せ、大規模化する機械群に対応できる電波活用システムの確立が今後の課題である。

表—1に、屋外で稼動する産業機械に遠隔操縦や自動化が求められている作業分野を例示した。

表—1 産業機械の遠隔操縦や自動化が求められている分野

	無人化導入要因	対象作業	備考
1	苦渋な現場 (有害、悪臭、苦渋)	高炉近傍作業、廃棄物処理、汚染土壌処理、コンクリートや塗料吹付、アスベスト除去、農薬散布、圧気ケーソン内作業、他	1940年代より導入
2	危険な現場	水中施工、災害救援・復興、崖や立孔近傍作業	無人化施工の契機
3	作業の容易化 (生産性の向上)	クレーン、ウインチ、コンクリート圧送車、クラムシェル、草刈機、枝打機、他	機側遠隔操縦で補助作業者省略
4	作業補助	積込み現場での集土、資材搬送、測量助手、他	補助機械も操縦
5	単純な繰返し作業	転圧、搬送、コンクリート削りや仕上げ、塗装、清掃、他	自動化例有

## 2. 遠隔施工技術開発

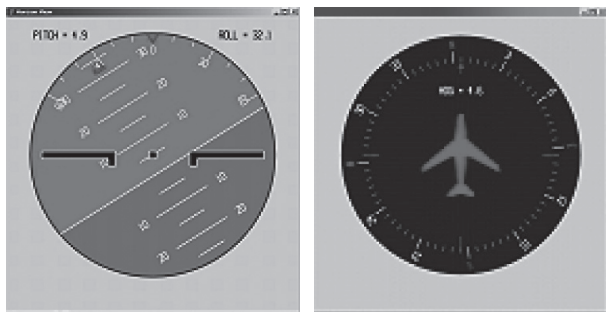
### (1) 遠隔操縦に必要な情報

作業機械から 30 ~ 50 m 程度離れた所から遠隔操縦を行なっている段階では、走行機構や作業装置を操作する情報伝送のみであったが、更に離れた場所、機械を見えない操作室からの操縦を行う場合には、機械周辺の映像や地形等の情報をオペレータに提供する必要がある。品質や生産性の要求に応えるためにも、現場や機械の情報をオペレータに逐次提供する必要がある。表一2が、産業機械の遠隔操縦に必要な情報、図一1が機械の姿勢表示例である。

表一2 産業機械の遠隔操縦に必要な情報

操作室→作業機械	作業機械→操作室
走行・作業装置遠隔操作	搭載カメラ映像
カメラ切替、旋回・俯仰・ズーム、操作	エンジン音 <span style="float:right">注1</span>
RTK-GPS データ等	建機の位置、姿勢、走行速度、エンジン回転数・水温・地形測量データ等 <span style="float:right">注2</span>

注1：ブルドーザの押土作業等でエンジン音の情報が押土量判断に有効  
 注2：施工管理及び機械管理情報



図一1 機械の姿勢表示例

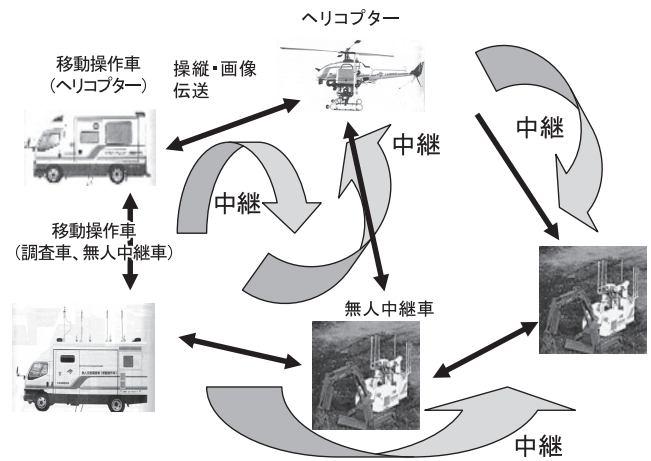
### (2) 情報の遠隔伝送の手段

1993年に雲仙普賢岳の災害復興工事で採用された「無人化施工」では、建機搭載や現場設置のカメラ映像で機械から数キロ離れた場所から建機を操縦した。

公衆回線を用いて首都圏から現場で稼働する建機を操縦する実験も行われた。

離れた所から機械を動かすために機械とオペレータが交わす情報の伝送手段として表一3がある。実際の現場では、伝搬距離や地形等状況に応じて、複数の伝送手段の組合せで対処するのが一般的である。伝搬性の高い音声認識機能を付与し、音声で帰還指示を行う等も想定できる。

表一3に、情報の遠隔伝送の手段、図一2に、電波が途絶えた場合のヘリコプタに依る救済案を示した。無人ヘリコプタ等では、GPS等で走行や飛行経路を掌握し、無線が途絶した際に自律的に経路を逆走して無線伝送可能な位置や基地に戻る等の対応を行なっている。



図一2 無線LANに依る陸・空の連携

### (3) 利用可能な電波

表一4に、現時点で可能な、作業機械やロボットの遠隔操縦を行うためのデータの空間伝送媒体例を示した。表中利用例の「有り」は、無人化施工等で採用された伝送媒体を示す。

表一3 情報の遠隔伝送の手段

想定される伝送手段			導入事例	備考
有線ケーブル方式			普賢岳実験施工/日立原発/千葉工大	走行速度と巻戻し・巻き取り速度同期、ケーブル張力・撓み制御が課題
中継方式	無線	無線中継基地	無人化施工(雲仙普賢岳, 他)	
		無線中継車	無人化施工(雲仙普賢岳, 有珠山, 他)	移動中継車, ヘリ中継の提案も
		メッシュネットワーク	作業船施工管理	
	有線+無線	光線+AP	矢沢川無人化施工, 他	注1
		光線+無線	福島原発調査ロボット	
		光線+AP+移動体中継	道理維持車両運行管理(高山国道, 他)	路車間通信+車両間通信

注1：光線：光ファイバーケーブル、AP：無線LANのアクセスポイント

表一 建機の遠隔操縦を行うためのデータの空間伝送媒体と評価

伝送媒体		得 失		利用例 注1	
		特徴・利点	欠 点		
27, 73 MHz：産業ラジコン用 (VHF)		1 km 汎用化され廉価	広範囲に普及し干渉の可能性		
170 MHz 帯 公共 BB 移動通信システム 注6		数 km 移動通信システム	無線局, 無線従事者免許要		
185 MHz 帯 公共 BB 注6		数 km			
400 MHz 帯 陸上移動局		数 km テレメータ, テレコントロール用	無線局, 無線従事者免許要	有り	
400 MHz 帯 簡易無線局		数 km	無線局免許要		
特定小電力無線装置 注2	400 MHz 帯 特定小電力無線装置	数百 m 広域利用向き。消費電力少, 廉価	無線従事者資格や無線局免許が不要	大容量データの伝送は不可 同地区での同一周波数帯の無線が利用でき干渉の可能性有り	有り
	950 MHz 帯 特定小電力無線装置	消費電力が少ない, 廉価			全上
	1.2 GHz 帯 双方向無線データ通信モデム	画像伝送可		CH 数が少ない	有り
汎用無線 LAN (小電力データ通信) 注3	2.4 GHz 帯 無線 LAN	汎用的で廉価, 多様なアンテナがあり, 伝送距離の延伸が可能。	多用されており混信の可能性。都市外では使用可	有り	
	5 GHz 帯 無線 LAN	屋外使用は届出が必要で混信回避可。波長が長い為, 降雨, 降雪等時の伝搬性に優れている。	特定小電力無線機に比べて消費電力が大きい	有り	
FWA/Fixed Wireless Access / 18, 22, 26, 38 GHz (18 GHz は公共業務用)		公共無線用 対向で 5 ~ 20 km, 高速データ通信が可能。	比較的高価, 機器・アンテナが大きく消費電力も大		
25 GHz 帯小電力データ通信システム用無線通信装置 注2		直進性で指向性が狭くアンテナを対向設定すれば混信の恐れがない。同一エリアで複数機器の使用が可能。LAN インターフェース仕様も有る。	波長が短く, 天候の影響を受け易い。特定小電力無線機に比べて消費電力が大きい	有り	
簡易無線 40 GHz 帯, 50 GHz 帯 注4		40 GHz: 公的用途の防災無線装置等, 50 GHz: 民生用	国内発売中止 (パソリンク)	有り	
60 GHz 特定小電力無線局		画像データ伝送用 / ビル間 TV 電波送受信等	伝送距離が短い, 高価		
微弱無線 電解強度規定値以下 注5		全周波数使用可	低出力で伝搬領域小	有り	
光空間伝送		見通しが前提の送受信装置 対向する指向角度が小さく混信し難い。	屋外の場合, 豪雪対策要 太陽光直射で赤外線が送受信器に入ると通信障害の可能性		
公衆回線 / 800 MHz 帯, 1.5/1.7/2 GHz 帯 (FOMA, HSDPA, HSPA 等)		公共用途で伝送路が安定している。導入コストが廉価。自前の保守が不要。	運用経費が高価。	有り	

注1: 利用例の「有り」は, 無人化施工等で採用された伝送媒体を示す。

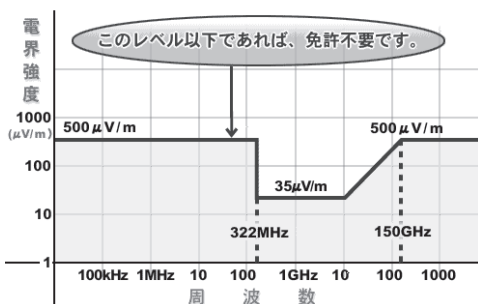
注2: 特定小電力無線局 (電波法施行規則第6条第4項第2号): 無線局の免許や無線従事者の資格が不要。2.4 GHz 帯汎用無線 LAN (IEEE802.11 b/g) 等は, パソコン用に多用され, 安価であるが混信の恐れがある。電子レンジ等の機器も近傍の周波数を用いている。

注3: 小電力データ通信 (電波法施行規則第六条第4項第4号): 無線局免許不要のデータ通信用無線局。周波数帯域毎の空中線電力が10ミリW以下。スペクトラム拡散 (SS) 変調方式の場合は幅1MHz当り10ミリW以下。

注4: 簡易無線局 (電波法施行規則第4条第1項第25号): 無線従事者の免許が不要

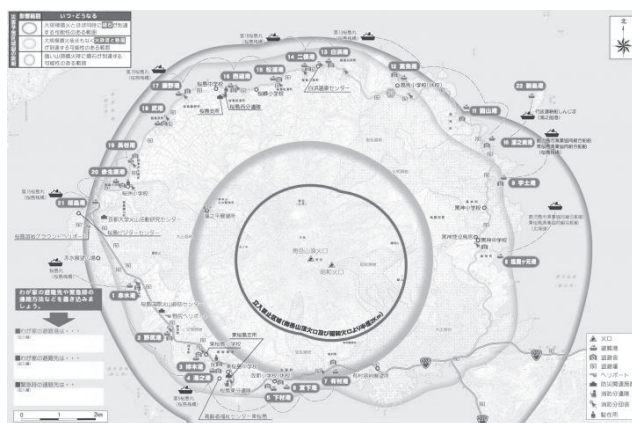
注5: 微弱無線 (電波法第4条第1項第1号): 無線設備から3メートルの距離での電界強度 (電波の強さ) が, 次の図一3に示されたレベルより低いものであれば, 無線局の免許を受ける必要はない。

【図: 微弱無線局の3mの距離における電界強度の許容値】



図一3 微弱電波境界図 (総務省ホームページ)

注6: 地上 TV 放送のデジタル化で使用可能となった帯域 (BB: ブロードバンド)



図一4 桜島に於ける立入禁止区域 (九州地方建設局ホームページ)

#### (4) 高出力電波使用例

火山等の災害に際しては, 火山活動の程度に応じた立入禁止区域が設定される。図一4が桜島に於ける立入禁止区域の大きさを示している。現在は, 赤線で囲まれた2kmの範囲である。災害出動時には, 立入

禁止範囲の外側に操作室を設置して, 調査ロボットや作業機械の操縦を行う。使用する電波には, 禁止範囲の大きさに応じた伝搬距離が求められる。立入禁止区域外から電波の到達を可能とするために, 災害発生時に特例として高出力無線機の使用を認められた事例も

表一5 実験電波の仕様

用途	標準仕様 (参考)	雲仙普賢岳 災害復旧工事	有珠山噴火時 注1	福島原発向緊急	火山探査高出力無線	備考
種別	SS デジタル無線	高出力SS デジタル無線	高出力SS デジタル無線	無線 LAN	無線 LAN	
認可年			2000年	2011年5月	2011年10月	
無線局の区別	小電力データ通信システム無線	業務用無線 (実験用)	業務用無線 (実験用) / 映像伝送用	+1W 増幅装置	+4W 増幅装置	
無線周波数	2.417 ~ 2.497 GHz	2.411 ~ 2.439GHz / 4波	2.4 GHz 帯	2.4 GHz 帯	2.342GHz	
占有帯域幅	26 MHz	22MHz	10 MHz / 8波	38 MHz	38 MHz	
空中線電力	10 mW/MHz 以下	500 m W	2 W	185 mW	600 mW	
データ伝送速度	2 Mbps	2 Mbps		54 Mbps (想定)	54 Mbps (想定)	
データ伝送距離	約 2 km (見通し)	最大約 5 km (見通し)	使用環境による	6 km 以上 (机上値)	6 km 以上 (机上値)	
変調方式	DSSS (スペクトル拡散 (直接拡散))		映像用は同左	OFDM	OFDM	
移動範囲	制限なし (全国)	島原市及び深江町 注2	西山川地区 2 km	福島及び千葉工業大学構内	浅間山周辺, 研究参加大学等構内	
免許	無線局	不要	要	要	要	
	無線従事者	不要	要	要	要	

注1: 2000年有珠山噴火時には、上表の他操作系用に 400 MHz 帯の業務用電波 (8波) も使用した。占有帯域幅は 12.5 kHz である。

注2: 水無川流域

ある。表一5が、雲仙普賢岳や有珠山での復旧工事、浅間山等での火山探査ロボット実験で採用された高出力無線である。

### 3. 今後の展開

東日本大震災で活躍した「無人化施工」や災害調査ロボットの技術は世界に誇れるものと評価されるが、開発体制、技術開発、運用面では下項の工夫が求めら

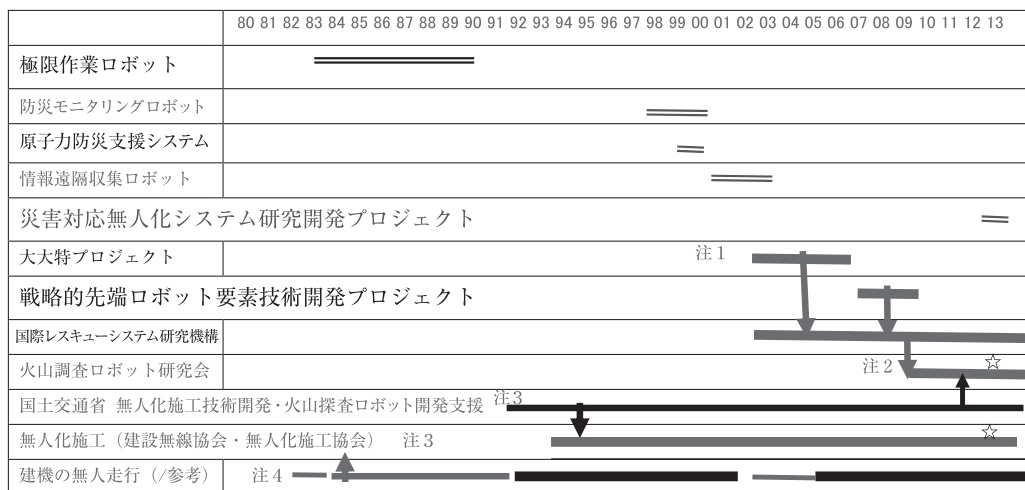
れる。電波利用面での課題も残されている。

#### (1) 技術開発体制面の課題

##### ① 研究投資の効率化

図一5に、日本での災害対応ロボット開発、運用の経緯を示した。開発事例の多くが短期的に研究開発費が投入されるプロジェクト型の研究で、殆どが一過性の開発で研究継承されていない。

国土交通省が20年間継続して支援している「無人



凡例: 「≡」: 開発したロボットは活用されず 「☆」: 福島原発に投入された  
 「→」: 技術継承ルート  
 「▶」: 国土交通省に依る開発支援 (組織的・継続的に行われている)  
 「■」: 無人ダンプトラック実運用例 (日鐵鉱業株, 住友大阪セメント株)

注1: 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト

注2: 火山エリアに於ける遠隔ロボット技術調査研究会 (主査: 油田信一筑波大学教授)

注3: 無人化施工協会 (☆), 火山調査ロボット研究会 (☆) には、国土交通省が組織的・継続的に支援を行なっている。

注4: 無人コンパクタの開発 (1982~1983), 無人ダンプトラックの開発 (1984~1991),

細字部は研究開発期間, 太線部は無人ダンプトラックの実稼働期間

図一5 ロボット開発・運用経緯



化施工」と、大学の研究者が中心に研究開発を行なっている「国際レスキューシステム研究機構」が弛みなく研究を継続し、福島原発事故での出動（図—5中☆）となった。

予算統制で継続的な研究や改良が困難な民間企業を支援するために、大学や公的研究機関が研究に参加する体制の構築が必須である。

②研究成果の共有

表—6が、「無人化施工技術の変遷」である。表中の「☆」印が基礎的な研究で、その多くの研究内容、成果が学会等での公表がされていない。分散して閉鎖的な研究環境を打破し、研究成果を広域的に活用できる仕組みの構築で、効率良く技術の向上が図れる。

③異分野との要素技術の交流

遭遇間隔の長い災害への対応技術は、必然的に継承、育成する仕組み創りが必要である。恒常的な研究開発を行なっている異分野技術の導入で、常に新しい技術を獲得する、災害対応として開発した技術を活かせる異分野を開拓し、その分野での技術向上を還流する等の仕組み創りが有効である。災害対応専用開発した技術を温存しても、10年、20年先の災害時には遺物となってしまふ。

(2) 技術開発面の課題

無人化施工の技術課題として下項がある。表—7に具体例を示す。

①災害時に適用する新しい電波の導入。

公共放送のデジタル化に依る集約で、長波長での

電波（VHF帯）が開放された。制御・センシングと映像情報の併送が可能で、地形や遮蔽物・瓦礫等の障害を回避（廻り込み）できる（公共BBシステム）。

図—6に示した、独立した送受信が可能なMeta-Material型送受信アンテナ6個を標準装備し、このアンテナを機械に分散配置することに依って全方位での無線通信が可能となり、登攀や旋回時で移動体の姿勢が替わっても無線伝送路が確保される。

無人移動機構の走行時等、傾きが前後30度、左右15度を超える場合がある。比較的指向角の広い平板型アンテナも半値角度は30度程度でダイバシティアンテナで受信可能な姿勢角を拡げても電波が途絶える場合がある。送受信及び遠距離での安定した通信を確保するためには、異なった方位を向いた多数のアンテナを装備する必要がある。6個のMeta-Materialアンテナを移動体に異なった方位に向けて装着する事に依って、移動体を取りうる全姿勢に於いて安定した通信が可能となる。上述のアンテナシステムと併せ、



170-200 中心周波数 185 MHz 平均 24.5 dBi  
 図—6 Meta-Material 型 6 面送受信アンテナ

表—7 無人化施工の技術課題

研究・開発項目	研究開発内容	備考
・公共BBシステム利用研究	実験局免許取得と遠隔操縦、計測データ伝送実験	①
・無線LANを用いた伝送空間広域化（APは移動体間通信も含む）	メッシュ構造の基礎実験に依る通信経路自己形成機能の確認 複数移動体を用いたフィールド実験での機能検証	①
・アクセスポイント最適配置計画立案	アンテナ機構実験、ロボットへの搭載箇所の確認 搭載時のロボット傾きへの追従性確認	
・現場に応じた中継方式の選択（伝送方式、周波数等調査と基礎実験）	同軸漏洩通信の基礎実験の実施 現場に応じた選択性の有るモデルシステムの概念構築 現場に応じて自由な組合せが即応可能な簡易着脱・接続型多段中継システムを構築	
・移動体姿勢と最適アンテナ選択	電波暗室でのアンテナ機能確認 とロボットへの最適設置箇所の机上検討と実機での機能検証	
・姿勢・映像情報等走行支援システム	姿勢センサ、画像等運転支線システムの基礎実験と最適仕様の決定 運転支援システムの実機装備（センサ類装備設備の整備/装着架台、LAN I/F等）	
・遠隔操縦作業分析に依る改善要箇所の抽出と改善案の確定	移動等反復動作の半自動化（実施例調査と基礎実験の実施）	②

検索結果

検索結果 25件中、1-20件目を表示

接続開始	接続終了	ユーザー	ステータス	接続場所	エラー
2002/09/25 09:57:45	2002/09/25 09:57:46	yuk@sprite.co.jp	接続終了(ユーザーから切断)	スプライト社内	
2002/09/25 09:54:40	2002/09/25 09:54:44	yuk@sprite.co.jp	接続終了(ユーザーから切断)	スプライト社内	
2002/09/25 09:54:40		yuk@sprite.co.jp	接続失敗(接続要求)	スプライト社内	
2002/09/25 09:54:40		yuk@sprite.co.jp	接続失敗(接続要求)	スプライト社内	
2002/09/25 09:52:30			接続失敗(ユーザー認証失敗)	スプライト社内	
2002/09/25 09:51:58		yuk@sprite.co.jp	接続失敗(ユーザー認証失敗)	スプライト社内	

いつ接続が開始されたか？

いつ接続が終了されたか？

誰がネットワークに接続していたか？

接続の状況は？

どこのACに接続されていたか？

図一七 ネットワークサーバの機能

GPS と姿勢センサを搭載し移動体の位置と姿勢をオペレータに表示する事で、安定した通信と機械転倒の抑止が可能となる。

②隔操縦作業分析に依る改善要箇所の抽出と改善案の確定

図一七に、無線 LAN にのネットワークを管理するサーバの機能例を示す。

LAN で統合される、各オペレータの遠隔操縦、カメラ操作信号を解析する事に依って、LAN で管理される全作業機械の操縦実態 (オペレータが待機、単純動作の反復等) をリアルタイムに把握する事ができる。

この伝送データの分析に依って、反復動作部位を自動化する、待機時間に他機械の操縦も行う、カメラ操作を行うなど、半自動化のポイントを抽出、自動化改造を行い、作業機械やロボットの自律度の向上を図る。

4. おわりに

技術集約の仕組み構築が課題。数十年待っても活躍の場が得られない可能性のある防災ロボット開発には、現時点の技術を集約したロボットを創出する研究体制、30年間弛まず改良を継続する仕組みをセットで構築する必要がある。従前の手法で、400億円級の開発費が投じられたが、砂上の楼閣であった。

表一六中の☆印の研究は筆者が直接間接に関わった事例を中心に記述した。多くの研究者の経験を重ねれば、更に多くの研究が存在する筈である。

大学や公的研究機関との連携等、開発プロジェクト終了後の研究の継承を前提とした開発計画が求められる。

《参考文献》

- 1) 「緊急時の無人化施工ガイドブック」(財先端建設技術センター 2001.7)
- 2) 永谷・油田・小柳・久武・他「小型クローラ移動ロボットの遠隔操作による火山活動区域の観察—高出力無線通信を用いた浅間山でのフィールド実験—」
- 3) 久武・中里「大災害に立ち向かうロボットの開発」建設の施工企画 No.740 2011.10
- 4) 久武・中里「大災害に立ち向かうロボット技術」土木コスト情報(財)建設物価調査会 2011.7
- 5) 中村「震災復興にむけて ロボット技術のいま「災害ロボティクス・タスクフォースが中長期的に果たす役割について」」公開シンポジウム 2011.5
- 6) 久武・中里「シリーズ 進化する土木ロボット①～⑩ 土木コスト情報(財)建設物価調査会 2008.7～2011.4
- 7) 久武「災害復旧時の無人化施工の課題と現状」建設機械 2008.12
- 8) 久武「第23回 国際建設ロボットシンポジウム (ISARC) — ISARC の20年を振り返って—」建設の施工企画 No.683 2007.1
- 9) 久武「災害調査の先兵「無人移動体」—危険・汚染区調査のためのプラットフォーム」建設の施工企画 No.659 2005.1
- 10) 久武「CONET2003 アカデミーロボットの開発状況—大学など公的研究機関による建設ロボットの開発状況—」建設の施工企画 No.647 2004.1

【筆者紹介】

久武 経夫 (ひきたけ つねお)  
(株)インロッド・ネット



中里 邦子 (なかざと くにと)  
(株)インロッド・ネット

