

作業用ロボット及び偵察用ロボットの搭載無線機の 機能高度化設計及び実装

Design and Mounting Advanced Wireless Communication Equipment on
the Crawler-type Robots for Tasks and on the Crawler-type Scouting Robot

西山 裕 岩井 正樹 椿 裕彦 千葉 悠介
早坂 寿郎 大野 隼人 羽生 敏紀

Yutaka NISHIYAMA, Masaki IWAI, Hirohiko TSUBAKI, Yusuke CHIBA
Toshiro HAYASAKA, Hayato OHNO and Toshinori HANYU

福島研究開発部門

福島研究開発拠点

櫛葉遠隔技術開発センター

Naraha Center for Remote Control Technology Development

Fukushima Research Institute

Sector of Fukushima Research and Development

August 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

作業用ロボット及び偵察用ロボットの搭載無線機の機能高度化設計及び実装

日本原子力研究開発機構

福島研究開発部門 福島研究開発拠点

櫛葉遠隔技術開発センター

西山 裕、岩井 正樹⁺、椿 裕彦、千葉 悠介、早坂 寿郎^{*}、大野 隼人^{*}、羽生 敏紀^{*}

(2020 年 5 月 22 日受理)

櫛葉遠隔技術開発センター遠隔機材整備運用課は、原子力災害特別措置法及び平成二十四年文部科学省・経済産業省令第四号「原子力災害特別措置法に基づき原子力事業者が作成すべき原子力事業者防災業務計画等に関する命令」(以下「計画等命令」という。)に対応するための日本原子力研究開発機構内の原子力緊急事態支援組織の中核を担っている。

同課の重要な任務に遠隔機材(作業用ロボット及び偵察用ロボット等)の整備がある。作業用ロボットに関し、既存の作業用ロボット(台車)に積載された原子力災害対応用マニプレータに付置するマニプレータ操作指令用無線機について、作業用ロボット(台車)の操作指令機能を付加する改良を設計し実装した。これにより作業用ロボット(台車)の操作指令の冗長化(当該無線機異常時に既設無線機への切替えによる台車操作指令)及び遠距離又は障害物等回避時使用無線中継ロボットの一元化(1台の中継ロボットで台車及びマニプレータの両操作指令中継)が図られた。(冗長性確保及び高機能付加)

また偵察用ロボットに関し、無線通信距離の確認を行った上で、無線強度を測定し、複数のアクセスポイントから最良のアクセスポイントを自動選択する能力を有する運用にとって最善の無線機を選定した。その後当該無線機を偵察用ロボット既存無線機と同時搭載する設計を行い、実装した。(冗長性確保及び高機能付加)

本報告書は、令和元年度に実施した、作業用ロボット及び偵察用ロボットの搭載無線機の機能高度化設計及び実装に関するものである。

櫛葉遠隔技術開発センター：〒979-0513 福島県双葉郡櫛葉町大字山田岡字仲丸 1-22

＋ 敦賀廃止措置実証部門 新型転換炉原型炉ふげん

* 株式会社アセンド

Design and Mounting Advanced Wireless Communication Equipment on
the Crawler-type Robots for Tasks and on the Crawler-type Scouting Robot

Yutaka NISHIYAMA, Masaki IWAI⁺, Hirohiko TSUBAKI, Yusuke CHIBA,
Toshiro HAYASAKA^{*}, Hayato OHNO^{*} and Toshinori HANYU^{*}

Naraha Center for Remote Control Technology Development
Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naraha-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken
(Received May 22, 2020)

Maintenance and Operation Section for Remote Control Equipment in Naraha Center for Remote Control Technology Development is the main part of the nuclear emergency response team of JAEA deal with Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness. The section needs to remodel crawler-type robots for tasks, crawler-type scouting robots, and so on.

About two crawler-type robots for tasks, the section designed and mounted advanced wireless communication equipment on manipulators mounted on the two robots. The crawler part of the robot has been able to be controlled by way of the new equipment, and when it is broken down, it can be changed by way of an original equipment. And the new equipment makes a single relay robot controllable both the crawler part and the manipulator part of the robot, in case of wireless relay robots being needed.

And after checking the ability and characteristic about 5 wireless communication equipment, the section chose and mounted the best equipment on one crawler-type scouting robot.

This report shows design and mounting advanced wireless communication equipment on the two crawler-type robots for tasks and on the one crawler-type scouting robot.

Keywords: Remote Control Technology, Crawler Robot, Wireless Communication Equipment,
Emergency Response, Naraha Center for Remote Control Technology
Development, JAEA

+ Fugen Decommissioning Engineering Center, Sector of Tsuruga Decommissioning
Demonstration

* Ascend Co.,Ltd.

目 次

1 はじめに	1
2 作業用ロボット搭載無線機の機能高度化設計及び実装	4
2.1 作業用ロボット搭載無線機の構成	4
2.1.1 作業用ロボット（台車）操作指令用無線機	4
2.1.2 マニプレータ操作指令用無線機	5
2.2 マニプレータ操作指令用無線機の機能高度化設計及び実装	5
2.2.1 設計条件	5
2.2.2 設計仕様	5
2.2.3 実装	6
2.2.4 実装の効果（高度化）について	7
3 偵察用ロボット搭載無線機の機能高度化設計及び実装	8
3.1 候補無線機の通信距離確認調査及び実装無線機の選定	8
3.1.1 通信距離確認調査の概要及び結果	8
3.1.2 実装無線機の選定	12
3.2 偵察用ロボット搭載無線機の機能高度化設計及び実装	13
3.2.1 設計条件	13
3.2.2 設計仕様	13
3.2.3 実装	13
3.2.4 実装の効果（高度化）について	14
4 まとめ	15
参考文献	15
謝辞	15
付録 A 無線中継ロボットの調達	16
付録 B 試験棟内ロボットの無線 LAN に関する調査	18

Contents

1	Introduction	1
2	Design and Mounting Advanced Wireless Communication Equipment on the Crawler-Type Robot for Tasks	4
2.1	The Constitution of Two Wireless Communication Equipment on the Crawler-Type Robot for Tasks	4
2.1.1	The Equipment for the Crawler Part of the Robot	4
2.1.2	Radio for manipulator operation command	5
2.2	Design and Mounting Advanced Wireless Communication Equipment for the Manipulator Part Mounted on the Robot	5
2.2.1	Design Requirements	5
2.2.2	Design Specifications	5
2.2.3	Mounting Advanced Equipment on the Robot	6
2.2.4	Effects Obtained by Advanced Equipment on the Robot	7
3	Design and Mounting Advanced Wireless Communication Equipment on the Crawler-Type Scouting Robot	8
3.1	Measuring the Communication Distance about 5 Transceivers and Choice the Best for Mounting on the Robot	8
3.1.1	Measuring the Communication Distance and the Result	8
3.1.2	Choice the Best Equipment for Mounting on the Robot	12
3.2	Design and Mounting Advanced Wireless Communication Equipment ----	13
3.2.1	Design Requirements	13
3.2.2	Design Specifications	13
3.2.3	Mounting Advanced Equipment on the Robot	13
3.2.4	Effects Obtained by Advanced Equipment on the Robot	14
4	Summary	15
	References	15
	Acknowledgements	15
	Appendix A Purchase of a Wireless Relay Robot	16
	Appendix B Measuring Energy and Number of Bits Transportation Speed of Wireless LAN in the Full-scale Mock-up Building in December, 2018 --	18

1 はじめに

平成 23 年に東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故が発生し、翌年原子力災害特別措置法及び平成二十四年文部科学省・経済産業省令第四号「原子力災害特別措置法に基づき原子力事業者が作成すべき原子力事業者防災業務計画等に関する命令」（以下「計画等命令」という。）が改正され、各発電事業者はその対応を行った。さらに平成 29 年に計画等命令が 10MW 以上の試験研究炉及び再処理施設にも適用されることとなり日本原子力研究開発機構（以下「機構」という。）も対応を行った。櫛葉遠隔技術開発センター（Naraha Center for Remote Control Technology Development）（以下「NARREC」という。）遠隔機材整備運用課（以下「運用課」という。）は、計画等命令に対応するための機構内の原子力緊急事態支援組織の中核を担う課（担当課）である。^{[1][2]}

運用課の重要な任務に遠隔機材（作業用ロボット及び偵察用ロボット等^[2]）の整備・運用がある。

作業用ロボットに関して、令和元年度に既存の作業用ロボット（台車）に積載されたマニピュレータに付置するマニピュレータ操作指令用無線機について、作業用ロボット（台車）の操作指令機能を付加する改良を設計し実装した。これにより作業用ロボット（台車）の操作指令の冗長化（当該無線機異常時に既設無線機への切替えによる台車操作指令）及び遠距離又は障害物等回避時使用無線中継ロボットの一元化（1 台の中継ロボット（中継用無線機搭載）（以下「中継ロボット」という。）で台車及びマニピュレータの両操作指令中継）が図られた（冗長性確保及び高機能付加）。Figure 1.1 に当該高度化の概念図を示す。

また偵察用ロボットに関して、令和元年度に搭載候補無線機（5 機種）に対して無線通信距離の確認を行い、その上で複数のアクセスポイントから無線強度を測定し、最良アクセスポイントを自動選択して通信ができる能力を有する無線機を選定した。そして当該無線機を偵察用ロボット既存無線機と同時搭載する設計を行い、実装した（冗長性確保及び高機能付加）。Figure 1.2 に当該高度化の概念図を示す。

本報告書は、令和元年度に実施した作業用ロボット及び偵察用ロボットの搭載無線機の機能高度化設計及び実装に関するものである。

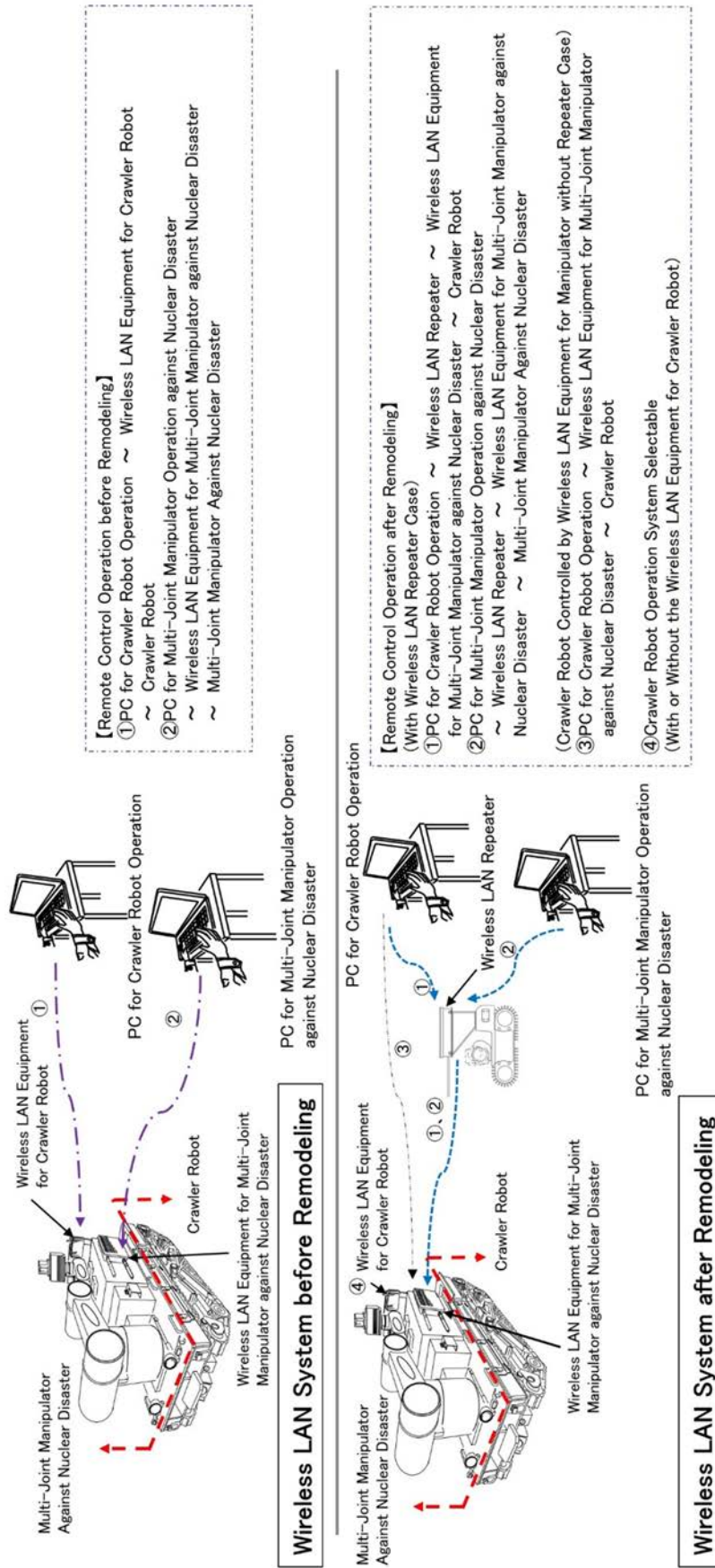


Figure 1.1 Images of Remodeling of Communication System for the Robot for Tasks against JAEA Nuclear Disaster

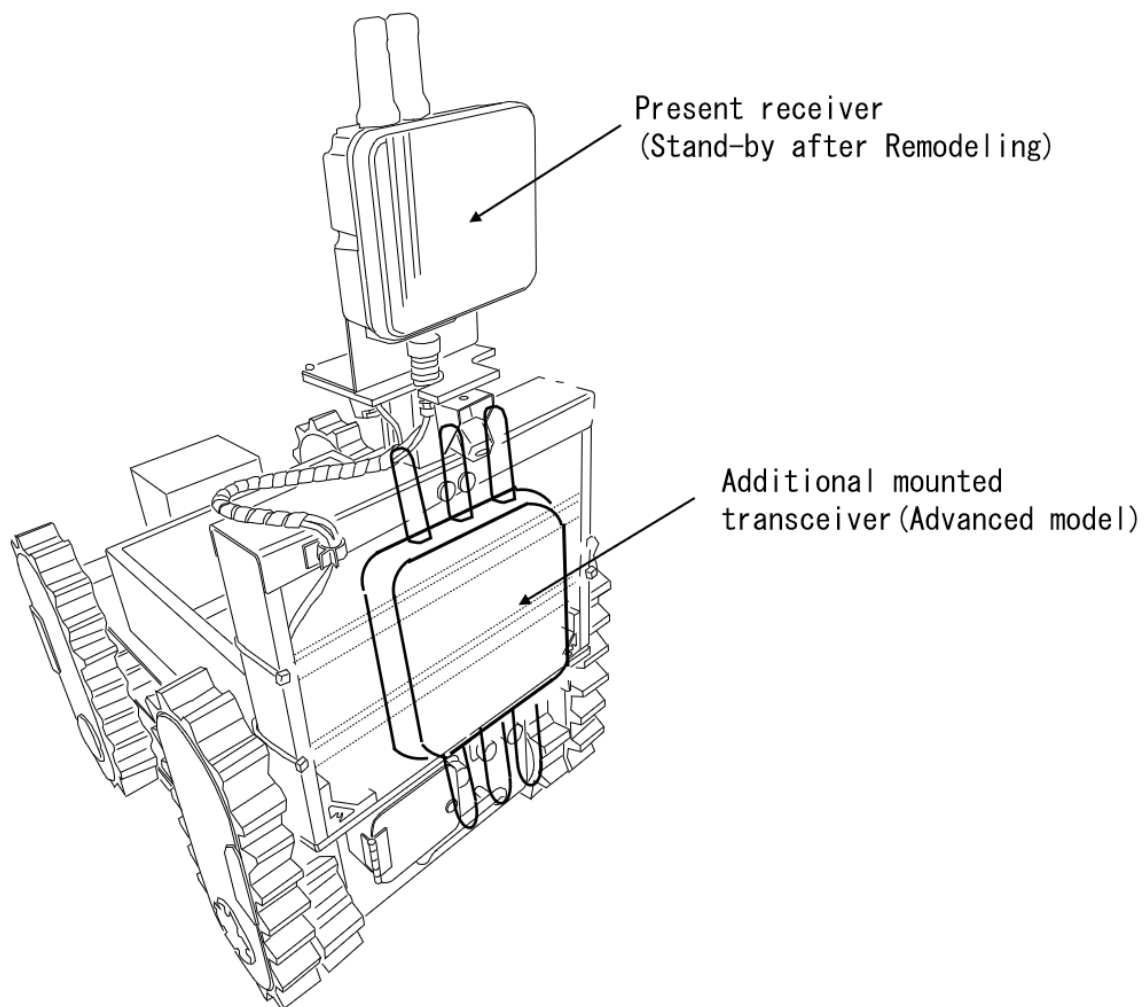


Figure 1.2 Images of Remodeling of Communication System for the Scouting Robot
against JAEA Nuclear Disaster

2 作業用ロボット搭載無線機の機能高度化設計及び実装

運用課が扱う作業用ロボット^④は、クローラ走行部分（以下「台車」という。）にマニプレータ等の作業機器（以下「マニプレータ」という。）を搭載して本体部分を構成する。この場合、1 台の作業用ロボット上に遠隔操作を可能とするため、台車部操作用無線機（以下「台車用無線機」という。）及びマニプレータ部操作用無線機（以下「マニプレータ用無線機」という。）の、計 2 台の無線機が装備される。令和元年度に、台車への指令をマニプレータ用無線機経由又は台車用無線機単独の選択式で通信ができるようにマニプレータ用無線機を改良した（機能の高度化）。

その結果、以下の利点が得られた。

① 作業用ロボットの台車の操作指令系統の冗長化

マニプレータ用無線機からも台車に指令できるようになった。なお、当該機異常時には従来の台車用無線機により台車に指令を行う。

② 無線中継ロボットの一元化

①と同じ理由により、中継ロボットを使用する場合に、1 台で台車及びマニプレータの両方の指令を中継できることとなった。

この②の背景は、以下のとおりである。

遠距離又は障害物等による通信障害を回避するには、遠隔操作用パーソナルコンピュータ（以下「操作用 PC」という。）と作業用ロボット間に中継ロボットを中継して、通信できるようにしている。この場合対象が作業用ロボットであれば、台車用及びマニプレータ用にそれぞれに 1 台、合計 2 台の中継ロボットを使用する必要があった。中継ロボットを 1 台に集約できれば合理的である。

本章では、マニプレータ用無線機から台車に指令できるように設計及び実装したことについて述べる。

2.1 作業用ロボット搭載無線機の構成

前述した 1 台の作業用ロボット上に 2 台の無線機が装備される理由は、台車部の通信体系及びマニプレータ部の通信体系が独立しており、それぞれ専用の操作用 PC により無線 LAN を介して、作業用ロボット上のそれぞれの無線機（子機）に通信するためである。（Figure 1.1）

本節では、作業用ロボット上の当該各無線機の仕様について述べる。

2.1.1 作業用ロボット（台車）操作指令用無線機

台車用無線機は、台車の後方上方に、搭載されている。

機器は、無線 LAN 子機である。仕様は以下のとおりである。

① 規格 : IEEE802.11/n

② 製品 : ICOM^③ 製 SE-800（以下「SE800」という。）

なお、操作用 PC は、その近傍で②の無線 LAN 親機である ICOM 製 AP-800（以下「AP800」という。）と有線 LAN 接続している。

2.1.2 マニプレータ操作指令用無線機

マニプレータ用無線機は、マニプレータ可動部を設置する躯体の左側面に、搭載されている。

機器は、無線 LAN 子機である。仕様は以下のとおりである。

- ① 規格 : IEEE 802.11/n
- ② 製品 : Buffalo^[4] 製

2.2 マニプレータ操作指令用無線機の機能高度化設計及び実装

既存のマニプレータ用無線機について、台車操作指令機能を付加する設計を行い実装した。

2.2.1 設計条件

操作用 PC から台車への指令を、従来の台車用無線機 (SE800) 経由に加えて、マニプレータ用無線機 (WAPM) 経由でも送信できるようにすること。

2.2.2 設計仕様

- ① 操作用 PC と AP800 間の有線 LAN 接続を切り離し、操作用 PC と WAPM 間を無線 LAN 接続できるようにする。
- ② 台車上の機器指令用パーソナルコンピュータの LAN ケーブルの SE800 への接続を切り離し、WAPM と接続できるようにする。
- ③ IP アドレス設定等、操作用 PC 及び台車上の機器指令用パーソナルコンピュータに必要な設定を行う。(①及び②の切り離し並びに接続を行った場合)

Figure 2.1 に①及び②の概念図を示す。

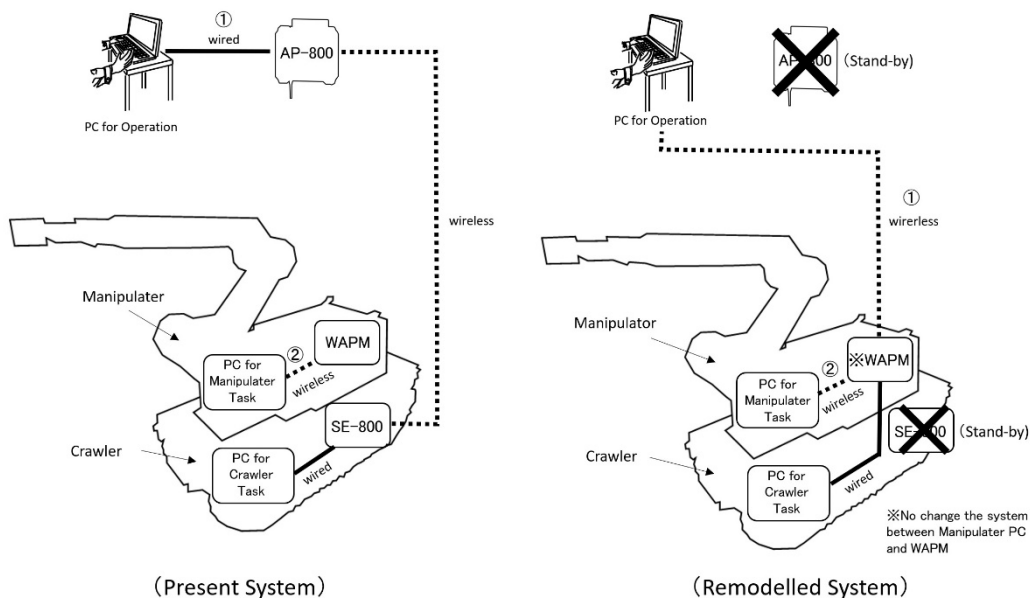


Figure 2.1 Remodeling of Communication System for the Manipulator on the Robot for Tasks against JAEA Nuclear Disaster

2.2.3 実装

台車（J-6 及び J-7）に実装作業を行った。ここでの実装とは、2.2.2 設計仕様に記載の切り離し及び接続をいう。

Figure 2.2 に実装後の J-7 上の SE-800（待機状態）と WAPM の写真を示す。

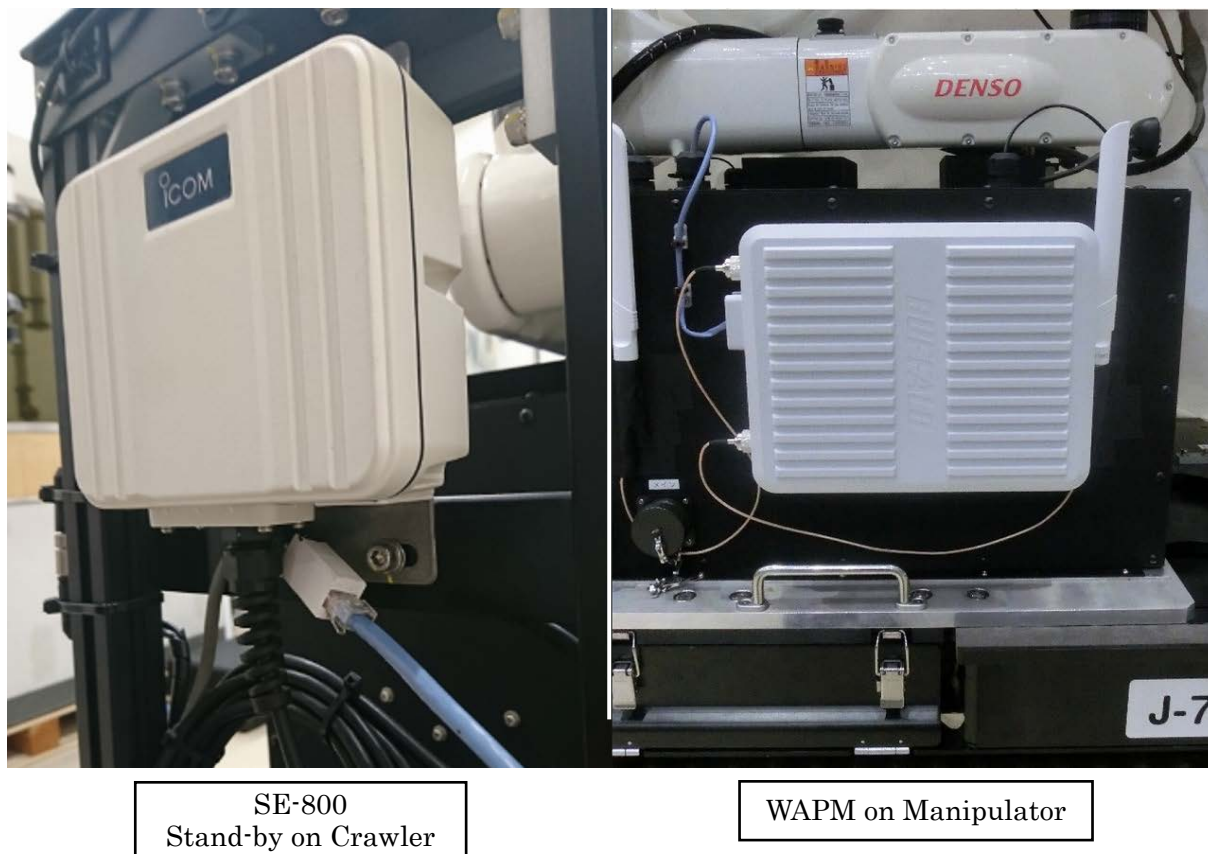


Figure 2.2 Receivers Photos on J-7(Crawler Robot with Manipulator)

2.2.4 実装の効果（高度化）について

実装した機器については、2 章冒頭で述べた基本設計どおりの効果が得られた。

実装後に得られた効果を表形式にして、Table 1 に示す。

Table 1 マニプレータの通信システムを改造したことによる
原子力災害対策用ロボットの効果

① ロボットのクローラ部分を操作するための二重の通信方法 ロボットのクローラ部分は、ロボットに搭載されたマニプレータの通信機器を介して制御することができる。従って、クローラ自身の通信機器が故障した場合でも、マニプレータの通信機器を介して使用することができる。
② ワイヤレスリレーロボット ワイヤレス中継ロボットが必要な場合は、ロボットのクローラ部分とマニプレータ部分を 1 台の中継ロボットで制御することもできる。

3 偵察用ロボット搭載無線機の機能高度化設計及び実装

複数の無線機に対して評価を行い、令和元年度にロボットに搭載すべき無線機を選定した。そして当該無線機を偵察用ロボットに既存無線機と同時搭載する設計を行い実装した（冗長性確保及び高機能付加による高度化）。(Figure 1.2)

本章では、平成 30 年度及び平成 31 年度に実施した 5 機種 of 無線機の通信距離の確認、並びにその結果と各機種の特徴も加味した評価を行い選定した無線機を偵察用ロボットに既存無線機と同時搭載する設計及びその実装に関して述べる。

3.1 候補無線機の通信距離確認調査及び実装無線機を選定

訓練の経験より NARREC の試験棟^[1]においては、ロボットを遠隔操作するための通信には鋼製柱やタンク類との干渉等により、届く距離の限界及び届かない箇所が存在することを確認している。今回、通信の届く距離の無線機の機種による違いの確認のため、4 回（5 機種）の調査を実施した。その調査結果及び各機種の特徴も加味した評価を行い、ロボット搭載用機種の選定を行った。

なお、今回の調査は、試験棟での確認であり、他フィールドでは、内部の建造物の材質や設置箇所等による干渉又は反射波によるものや無線機のアンテナの位置等により通信の到達距離が変化することから、無線機自体の性能を決めるものではない。

本節では、当該調査の概要及び機種を選定結果について述べる。

3.1.1 通信距離確認調査の概要及び結果

調査を行った試験棟の外観写真を Figure 3.1.1 に、試験棟内確認場所の平面図を Figure 3.1.2 に示す。



Figure 3.1.1 A Photo of the Full-scale Mock-up Building as Used Area of Transceiver Testing

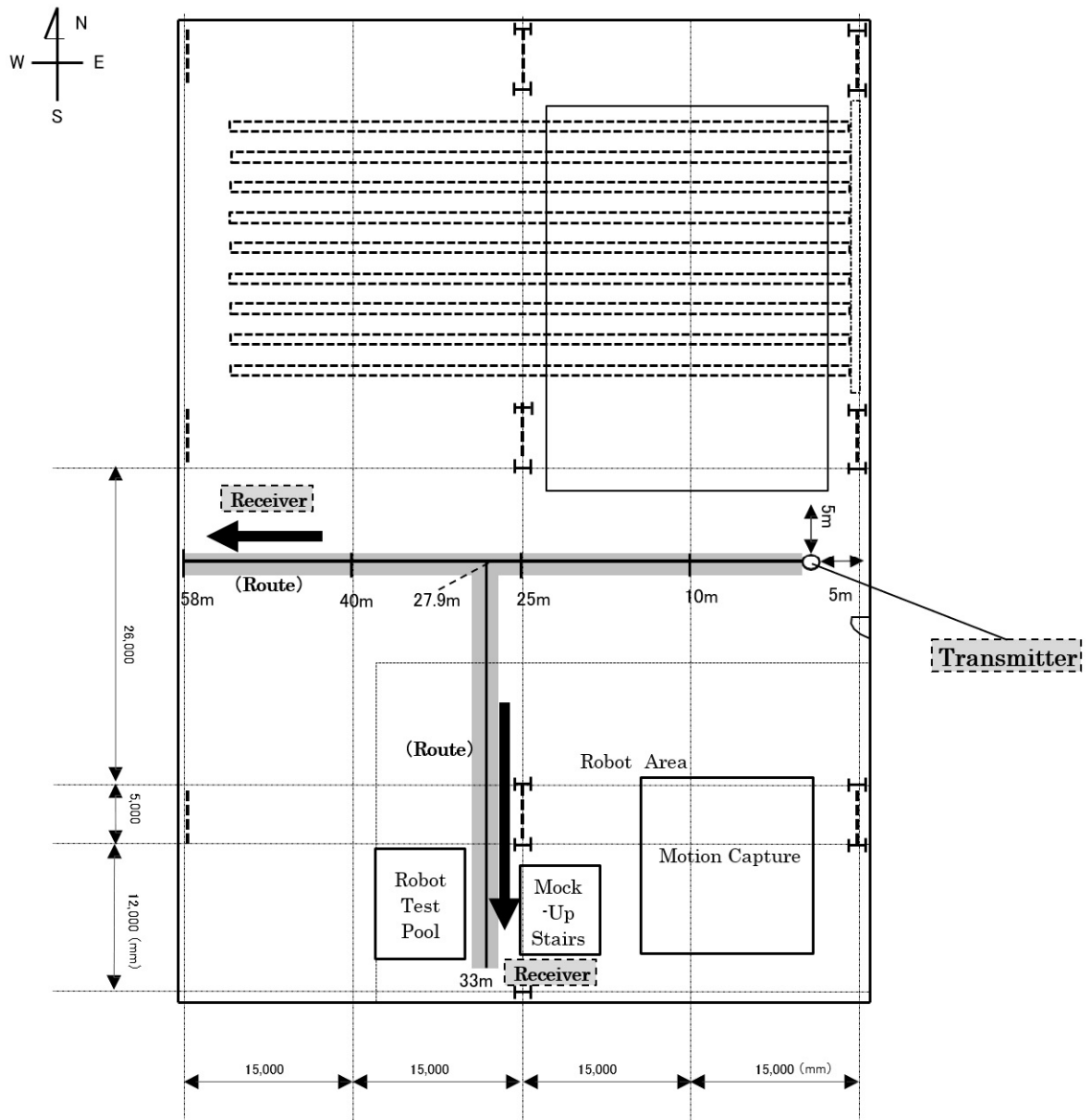


Figure 3.1.2 Ground Floor Plan of the Full-scale Mock-up Building
as Used Area of Transceiver Testing

① アイコム株式会社^[3]製無線機（2機種）の調査

試験棟において、偵察用ロボット J-11^[2] 及び作業用ロボット（ロボット台車 J-6 及びその搭載設備 JT-23^[2]により構成）に既設のアイコム株式会社^[3]製 AP-900（操作用 PC 側に有線 LAN で接続されている（J-11 用親機））、SE-900（ロボット側に搭載している（J-11 用子機））及び AP-800（操作用 PC に有線 LAN で接続されている（J-6 用親機及び J-23 用親機））、SE-800（ロボット側に搭載されている（J-6 用子機及び J-23 用子機））を用いて、親機と子機間の通信の届く距離の確認調査を行った。

その結果、AP-900（SE900）及び AP-800（SE800）の各単独使用時には、今回調査可能距離の上限値の西側 53m 並びに南側 33m の距離が得られた。また、作業用ロボット（J-6 及び JT-23）のそれぞれの AP-800（SE800）の同時使用では、西側 45m 及び南側 33m の距離が得られた。

なお、この 2 機種については、親機を Figure 3.1.2 の平面図の外側に配置した場合には通信できなかった。

② ASUS JAPAN 株式会社^[5]製無線機の調査

試験棟において、Lyra Trio（デュアルバンドメッシュ Wi-Fi）を偵察用ロボット J-5^[2]に搭載して、操作用 PC 側に有線 LAN で接続されている無線機（以下「親機」という。）とロボット側に搭載されている無線機（以下「子機」という。）の間の通信の届く距離の確認調査を行った。

その結果、今回調査可能距離の上限値の西側 53m 並びに南側 33m の距離以上が得られた。ここで上限値の距離以上と表記したのは、親機を Figure 3.1.2 の平面図の外側に配置した場合（試験棟研究室 4）でも通信できたためである。

③ 株式会社バッファロー^[4]製無線機の調査

作業用ロボットのマニピュレータの WAPM（2.1.2 に既述）を用いて、親機と子機間の通信の届く距離の確認調査を行った。

その結果、今回調査可能距離の上限値の西側 53m 並びに南側 33m の距離以上が得られた。ここで上限値の距離以上と表記したのは、親機を Figure 3.1.1 の試験棟の外側に配置した場合（NARREC 南門）でも通信できたためである。

④ シャープ株式会社^[6]製無線機の調査

無線機 QX-C300 を偵察用ロボット J-5 に搭載して、親機と子機間の通信の届く距離の確認調査を行った。

その結果、今回調査可能距離の上限値の西側 53m 並びに南側 33m の距離以上が得られた。ここで上限値の距離以上と表記したのは、親機を Figure 3.1.2 の平面図の外側に配置した場合（試験棟玄関ホール）でも通信できたためである。本機は親機側出力が 6 段階で調節可能であったため、この場合において親機側出力を最も低下させた状態で確認を行い問題なく通信ができた。本機は③の機種より遠距離においても通信可能である。

以上①～④の結果を Table 2 に、各無線機の外観写真を Figure 3.1.3 にそれぞれ示す。

Table 2 Results of Measuring the Communication Distance about 5 Transceivers

Transmitter, (Receiver)	West Direction (m)	South Direction (m)	Notice
①-1 ICOM : AP-900 (SE900)	53	33	Maximum Values in case ①
①-2 ICOM : AP-800 (SE800)	53*	33*	
	45**	33**	
②ASUS : Lyra Trio	53 or more	33 or more	From South Gate of NARREC
③Buffalo : WAPM	53 or more	33 or more	From Entrance Hall
④SHARP : QX-C300	53 or more	33 or more	From Entrance Hall Lowest Power Chosen

* Single System Using

**Double System Using (Both Arm and Crawler Communication System
Using at the Same Time)



Figure 3.1.3 Photos of Tested 5 Transceivers

3.1.2 実装無線機の選定

前項 3.1.1 の通信距離確認結果だけを基準に選定すると、ASUS JAPAN 株式会社^[5]製 Lyra Trio が実装無線機に選定される。しかし以下の理由により、シャープ株式会社^[6]製無線機 QX-C300 を実装無線機に選定した。

① ASUS JAPAN 株式会社^[5]製 Lyra Trio を選定しなかった最大の理由

Lyra Trio は、通信障害等が発生した場合に、その事実を操作者に伝達する機能を有しない。この事実は、前項 3.1.1 の確認時において判明した。

具体的には、Lyra Trio 使用時に操作者がロボットを操作できないと認知したとき、その原因が当該機の通信等の障害によるものか、ロボット駆動機構の障害（故障又は障害物との接触等）によるものか、操作者がその場で判断できない。

このことが、Lyra Trio を選定しなかった最大の理由である。

② ASUS JAPAN 株式会社^[5]製 Lyra Trio の信頼性及び耐久性

Lyra Trio は、家庭用パーソナルコンピューター類の通信使用が前提の製品であり、前項 3.1.1 の他の機種のように業務上使用された実績が不明である。固定されることはなく、振動を伴う移動が前提のロボットの使用条件における信頼性及び耐久性が未知の機種であることも、実装無線機に選定されなかった理由に挙げられる。

実際に前項 3.1.1 の通信距離確認使用時において、本機は原因不明の通信障害を 1 回発生し、信頼性に欠ける印象を与えた。

③ シャープ株式会社^[6]製無線機 QX-C300 が実装無線機の特徴

無線機 QX-C300 に以下の特徴のあることが、前項 3.1.1 の調査において確認された。

ア 単機（中継機使用の無い状態）で、Lyra Trio に次いで、長い距離の通信が可能であった。

イ 親機及び子機を含め最大 20 機（中継機最大 18 機）を用いた中継による無線が可能であり、必要時には、より長い距離の通信が可能となる。この場合複数の中継機（アクセスポイント）から最良アクセスポイントを自動選択する能力も有す。

ウ 親機及び中継機に無線機 QX-C300 を用いる場合、子機がアイコム株式会社^[3]製無線機であっても通信可能である。

エ 親機及び子機間で通信が途絶えた場合に、中継機を投入するのみで、自動で通信可能となる。ただし全機が無線機 QX-C300 でなければならない。

オ 無線強度が確認できるとともに、PC 上にどこの中継機が親機や子機の接続又は切断されているか確認が可能であることから、通信途絶の発生時において操作員は早期に上述エの対処が可能であり、正常に通信できていることも確認できる。

カ 欠点として消費電力が前項 3.1.1 の他の機種よりも大きいことが挙げられる。

しかし前項 3.1.1 の通信距離確認使用の 2 時間程度は問題なく使用できたため、使用に大きな障害とはならない。

以上①～③により、シャープ株式会社^[6]製無線機 QX-C300 を実装無線機に選定した。

3.2 偵察用ロボット搭載無線機の機能高度化設計及び実装

前項で選定したシャープ株式会社^⑥製無線機 QX-C300 を、令和元年度に偵察用ロボット J-12（仕様は、同 J-11^②に同じ）の既存無線機アイコム株式会社^③製 SE-900 と同時に搭載する設計を行い、当該ロボットに実装した（冗長性確保及び高機能付加による高度化）。(Figure 1.2)

本節では、当該設計及び実装について述べる。

3.2.1 設計条件

偵察用ロボット J-12（以下「J-12」という。）を、既存無線機 SE-900 を介する操作指令に加え、接続切替等により既存無線機ではなく無線機 QX-C300 を介する操作指令を可能とする改造をすること。

3.2.2 設計仕様

J-12 背面の既存無線機取付台を大型化し、既存無線機の下方に無線機 QX-C300 を取り付ける。

既存無線機と無線機 QX-C300 との切り替えは、LAN ケーブルの差し替えにより行う。

操作用 PC の無線機（親機）を既存無線機（親機）AP-900 から、無線機 QX-C300 に交換する。(3.1.2 ③ ウにて動作確認済)

3.2.3 実装

作成された作業手順書を元に、実装作業を行った。ここでの実装とは、3.2.2 設計仕様に記載の作業をいう。試験検査の結果、所要の機能を満足することを確認した。

Figure 3.1 に無線機を 2 台実装した J-12 の写真を示す。

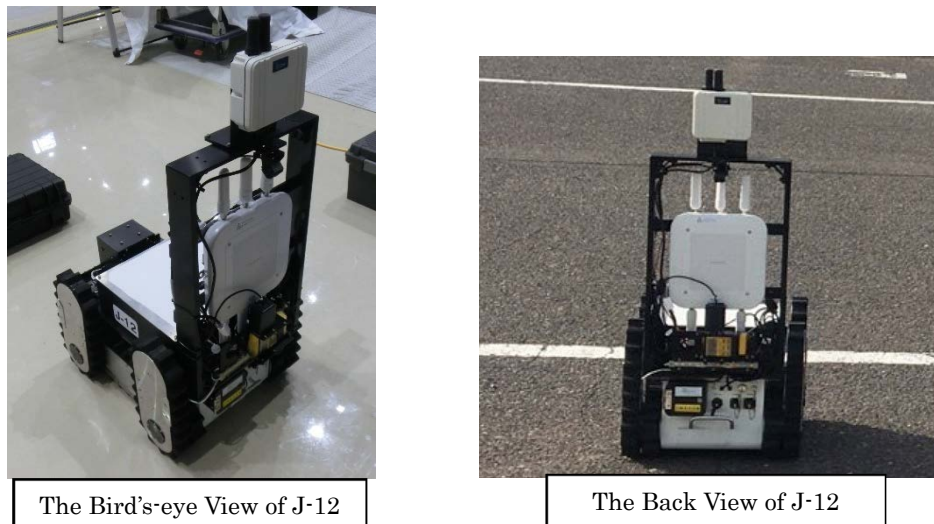


Figure 3.1 Photo of Two Receivers(SE-900(upper) & QX-C300(lower)) Mounted on J-12

3.2.4 実装の効果（高度化）について

実装後は、冗長性確保及び 3.1.2 ③ 記載の特徴を有す無線機搭載による機能付加による高度化といった基本設計どおりの効果が得られた。

実装後に得られた効果を表形式にして、Table 3 に示す。

Table 3 原子力災害用偵察ロボットの通信システムの改造による効果

① 偵察ロボットを操作するための二重のコミュニケーション方法 偵察ロボット（J-12）は、追加された通信機器を介して制御することができる。従って、機器が故障した場合は、もう一方の通信機器に切り替えて使用することができる。
② 偵察ロボットに高度な通信機器を追加 無線中継ロボットが必要な場合は、最大 18 台の中継ロボットを使用できるため、無線通信をより遠くまで行うことができる。第二に、無線中継ロボットが追加で必要な場合、現場に設置された中継ロボットに自動的に通信が繋がる。

4 まとめ

令和元年度に作業用ロボット上のマニピュレータ操作指令用無線機について、当該マニピュレータを積載する作業用ロボット（台車）に対する操作指令機能を付加する改良を設計し、作業用ロボット（台車 J-6 及び J-7）に実装した。これにより作業用ロボット（台車）の操作指令の冗長化及び無線中継ロボット使用中継ロボットの一元化が図られた。

また、搭載候補無線機の通信距離の確認を行い、その上で無線強度が確認でき、また複数のアクセスポイントから最良アクセスポイントを自動選択する能力を加味して、運用上の最善機を選定した。そして当該機を偵察用ロボット既存無線機と同時搭載する設計を行い、偵察用ロボット（J-12）に実装した。これにより J-12 の操作指令の冗長化及び高機能無線機の搭載が図られた。

今後、機構内の原子力緊急事態発生時に対応できるよう、ここで報告したロボットを用いて、課内の日常訓練及び各拠点操作要員に対する訓練を実施する予定である。

参考文献

- [1] 櫛葉遠隔技術開発センター, 2017 年度 櫛葉遠隔技術開発センター年報, JAEA-Review 2018-029, 2019, p.31-p.38.
- [2] 千葉 悠介, 西山 裕, 椿 裕彦, 岩井 正樹, 緊急時対応遠隔機材の機構内各拠点操作員育成プログラム初級編・中級編, JAEA-Technology 2019-002, 2019, 29p.
- [3] アイコム株式会社, <https://www.icom.co.jp/> (accessed March 27, 2020) .
- [4] 株式会社バッファロー, <https://www.buffalo.jp/> (accessed March 27, 2020) .
- [5] ASUS JAPAN 株式会社, <https://www.asus.com/jp/> (accessed March 27, 2020) .
- [6] シャープ株式会社, <https://corporate.jp.sharp/> (accessed March 27, 2020) .

謝 辞

運用課で整備を行った作業用ロボット及び偵察用ロボットにおける無線機の高度化設計及び実装にあたっては、鈴木健太氏がこれまで経験された知識に拠るところが多岐であり、多くの助言を頂けたことに感謝を申し上げます。また、ロボットの点検を手掛けている請負業者の株式会社アセンドの通野和人氏、志賀辰也氏、猪狩聡治氏におかれましては、NARREC の試験棟での本作業における各種データ採取や実装時の助言をいただき、併せて御礼を申し上げます。

付録 A

無線中継ロボットの調達

令和元年度に、遠距離又は障害物等回避時に使用する無線中継ロボットを 1 台調達した。具体的には、市販の住宅床下点検用ロボットを購入し、機構が所有する無線中継機を当該ロボットに搭載し、遠隔制御できるよう改良した。ここでは、その概要を報告する。

1. 購入品仕様

大和ハウス工業株式会社製 狭小空間点検ロボット moogle evo (相当品可)

イ. 本体 : 1 台

① 点検用カメラ 1 台

- ・ 水平視野角 ; 40 度以上、左右稼動範囲 ; 200 度以上、光学ズーム ; 30 倍以上

② 移動用カメラ 1 台

- ・ 水平視野角度 ; 100 度以上

③ 寸法

- ・ 全幅 : 300mm 以下
- ・ 全長 : 500 mm 以下
- ・ 後部高さ : 300 mm 以下

④ 機能

- ・ 10cm の段差乗り越え
- ・ 積載荷重 : 4kg

ロ. 操作用 PC : 1 台

ハ. 無線コントローラ : 1 個

ニ. 収納ケース : 1 台

ホ. 充電器 : 1 台

ヘ. バッテリー : 2 本

2. 搭載無線中継機

Buffalo 製 AirStationPro WAPM-1266WDPR (本文 2.1.2)

3. 無線機中継機搭載作業

1.イ.本体の後方の上方に搭載台を取り付け、2.の無線中継機を搭載した。

そして LAN ケーブルにより、当該機と 1.イ.本体の追加機材用拡張コネクタと接続した。

完成した無線中継ロボットの外観写真を Figure A に示す。



Figure A Photo of the purchased wireless relay robot

付録 B

試験棟内ロボットの無線 LAN に関する調査

本文 3.1.1 ① アイコム株式会社製無線機（2 機種）の確認調査において、本文で述べた無線の届く距離の確認調査以外に、無線 LAN レベル及び通信速度（Mbps : Megabit Per Second）の確認調査も行った。ここでいう無線 LAN レベルとは、信号強度を意味し単位時間当たりの通信エネルギー量と定義されるものである。当該量の数値を汎用のソフトウェアを用いて、負の dBm 単位（1mW=0dBm として関係を対数表記）で操作用 PC に表示している。経験上当該数値が-40dBm（=-0.0001mW）以下（数値の絶対値が 40 以上）となった場合、ロボットと通信できなくなる可能性が高まると認識している。

ここでは、無線機（2 機種）を用いた無線 LAN レベル及び通信速度の確認調査について報告する。

無線 LAN レベル調査結果

1. 概要

作業用ロボット、偵察用ロボットについて、遠隔操作しているが、フィールド等の状況により遠隔操作範囲が変化する。このため、試験棟で無線 LAN レベルを測定することにより、各ロボットの無線 LAN レベルの状況を把握するとともに、その結果に基づき改善できるものがあるか検討する。また、今後の無線中継機の設置場所等の検討に資することとする。

2. 内容

遠隔操作している各ロボットは、2.4GHz 帯を使用している。その理由として、無線局の免許が不要で使いやすいことのメリットがある。しかし 2.4GHz 帯は、Bluetooth 使用機器や電子レンジ等他の多くの機器も利用する帯域としても使用されている。

NARREC試験棟内も同様に多数の無線アクセスポイントによる無線を使用している。今まで NARREC試験棟内でロボットの通信が途切れる事象が発生しており、今回の調査では可能な限り、無線アクセスポイントを停止させた状態で無線状況を確認する。また、同じ条件で無線アクセスポイントを使用しているときの無線状況と比較することでその影響を調査した。

(1) 調査方法

イ. 測定項目

- ① 操縦装置（以下「マスター」という。）の PC で表示される無線 LAN レベルの確認
マスターの PC に表示されるロボット操作ソフトウェア上の無線 LAN レベルのデータを確認する。

無線 LAN レベルが 40 程度以下と低くなった場合、ロボットとの通信不可となることもあり、それに伴いロボットは停止することもあった。

② PC で表示する通信速度の確認

マスターのPCに「TCP Monitor Plus」というソフトウェアをインストールして通信速度を確認する。

送信及び受信レベルを測定するが、送信レベルはマスターからロボットへの通信状態が分かるが、通信量として少ないため、表示される送信レベルも小さい。受信レベルは、ロボットからの情報を受信するものであり、受信レベルが低くなるとロボットとの通信が不可となり、ロボットは停止する。

③ PC にて 2.4GHz/5GHz の無線電波状態の確認

新たに準備したPCに「inSSIDer Home」というソフトウェアをインストールして無線電波状態を確認する。

ロボットの場所において、他の無線LANレベル及び使用チャンネルが確認できる。ロボットと同じチャンネルが他の無線で使用された場合、干渉によりロボットが停止する可能性がある。

④ PCにて通信速度（最大値）の確認

新たに準備したPCに「Raspberry Pi」というソフトウェアをインストールして通信速度（最大値）を確認する。

上記②の通信速度は、使用している通信速度であるため、通常大きな変動はないが、通信速度（最大値）は、干渉や無線が届かなくなる場合、その影響で通信速度（最大値）が変化して無線環境が把握できる。特にマスターとロボット間の距離において、通信速度に余裕があるか否か確認できる。

通信速度（最大値）は、受信速度と送信速度がある。前者は、ロボットからの画像や動作信号がロボットから送られてくるものであり、後者は、マスターからロボットに操作信号を送るものである。

ロ．無線 LAN レベル等の測定範囲

マスターは、東側のシャッター付近に設置し、ロボットを西側に 53m 操作して 5m 毎に無線 LAN レベル等を測定する。また、西側に 27.9m 移動し、その後南側に 33m 操作して 5m 毎に西側と同様に測定する。（西側の 27.9m を基点（0m）とする。）

ハ．調査実施日

① NARREC内の無線 LAN の切断

NARRECで使用している無線 LAN は、以下のとおりである。

(イ)大型モニター用無線

(ロ)ゲストネット

(ハ)機構ネットワーク用の無線

付属建屋1階の研究準備室に設置されているゲストネット無線アクセスポイント以外は、すべて切断してデータの確認を行った。

(ニ)実施日

平成 30 年 12 月 3 日 10 時～16 時まで

(ホ)調査対象ロボット

J-5、J-6、J-11、JT-23 の4台

② NARREC内の無線 LAN の通常（使用）状態

NARRECで使用している無線 LAN を通常の使用状態でデータの確認を行った。

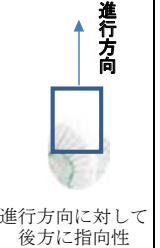
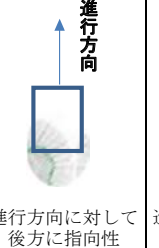
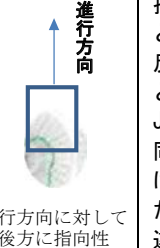
(イ)実施日

平成 30 年 12 月 5 日

(ロ)調査対象ロボット

J-6、J-11、JT-23 の3台

二. 無線の仕様

	偵察用ロボット		作業用ロボット		備考
機材名	J-5	J-11	J-6	JT-23	
無線機名	ICOM 製 AP-800	ICOM 製 AP-900	ICOM 製 AP-800	ICOM 製 AP-800	
アンテナ	AH-171 (無指向性)	AH-171 (無指向性)	AH-171 (無指向性)	AH-171 (無指向性)	
アンテナの指向性 (送信する方向)	水平 約 360° 垂直 約 80°	水平 約 360° 垂直 約 80°	水平 約 360° 垂直 約 80°	水平 約 360° 垂直 約 80°	無線親機－無線子機間に 高低差があると無線強度 が下がる
無線子機	ICOM 製 SE-800	ICOM 製 SE-900	ICOM 製 SE-800	ICOM 製 SE-800	
アンテナ	内蔵アンテナ (指向性)	内蔵アンテナ (指向性)	内蔵アンテナ (指向性)	内蔵アンテナ (指向性)	
アンテナの指向性 (受信感度が良い方向)	 進行方向に対して 左側に指向性	 進行方向に対して 後方に指向性	 進行方向に対して 後方に指向性	 進行方向に対して 後方に指向性	指向性の範囲から外れる と無線強度が下がる（特に 反対向きで高低差があると 著しく下がる） J-5 と JT-23 は、無線機は 同じであるが、J-5 の子機 は、横に取付けられている ため、JT-23 とは指向性が 違う
使用した帯域	2. 4GHz	2. 4GHz	2. 4GHz	2. 4GHz	すべて 5GHz も使用可能(た だし屋内に限る)
使用したチャンネル	9ch	9ch	5ch	9ch	同じチャンネルにすると 混線(電波干渉)する
帯域幅モード	40Mhz	40Mhz	40Mhz	40Mhz	20MHz と 40MHz から選択可 40MHz は通信速度が速いが 他の電波と干渉しやすい

(2) 調査結果

NARREC内の無線LANの切断と通常（使用）状態では、問題になるような差はなかった。

イ. J-5

- ① 西側は、マスターとJ-5の距離が徐々に大きくなると、J-5の通信速度（max）は、徐々に下がった。また、通信速度（実測値）のうち、目視で確認したところ、20～30m 付近では、通信速度が上下（0～16Mbps）して不安定であったが、53mまで到達した。
- ② 西側 30m、35m、40m の地点では、通信速度（max）の上下があった。無線LAN レベルでは、少し下がったが、ほぼ一定であった。原因の特定は、出来ないが、反射波の影響による干渉性フェージング※ によるものと推定される。
- ③ 南側において、他のロボットより通信速度（max）が上昇しなかった。理由として考えられることは、無線子機の取付け位置が他のロボットと違うためと推定される。
- ④ 南側の 20m 付近の地点以降は、無線を受信できなかったため実測は中止した。

※干渉性フェージング：送信点から受信点に至る伝搬経路が複数あり、その経路の間で経路長の差が変動する時に起こる。例えば、経路が2本ある場合、一つは、直接アンテナに届くが、他の一つは、柱等による反射波がアンテナに届くとする。反射波は、 λ （波長）/2 の時は、位相が逆（逆位相）になるため、弱く受信される。

ロ. J-11

【西側】

- ① マスターとJ-11の距離が徐々に大きくなることにより、J-11の通信速度（max）は徐々に下がった。しかし、20～30m付近から少し上昇かほぼ一定となった。これはフィールドの環境により、無線の特性上一定になる可能性もある。
 なお、無線LANレベルは、25m以降でも通信速度は、ほぼ一定であったことから53mまで通信状態は良好であった。
- ② 混雑チャンネルを使用した場合、マスターとJ-11の距離が30m付近から影響が出始めた。

【南側】

- ① NARRECの無線LAN停止において、マスターとJ-11の距離が25mと33mで通信速度が低くなった原因としては、マスターとJ-11との間に鉄骨の柱やモックアップ階段などの障害物の影響があるためと推定される。また、25mについては、NARRECの無線LANを停止していると通信速度は低くなっているが、通常状態での実測は実施していないため、通常状態も同様な状態となったと考えられる。
- ② 徐々に通信速度が高くなっていくが、J-6 についても同様な傾向であるため、横向きによるアンテナの指向性が関与していると推定される。

ハ. J-6 と JT-23

【西側】

マスターとJ-6、JT-23の距離が大きくなると、両ロボットの通信速度（max）は徐々に下がった。

- ① NARREC AP停止時において、J-6、JT-23ともに35m まで無線状態は安定していた。
 J-6 の 40m、45m では、通信速度（max）が上下して不安定だった。
 JT-23 の 45m では、無線が切れたが、再接続が可能であった。また、J-6、JT-23 ともに 45m で無線は切れた。再接続不可であったため、JT-23 を切として J-6 を再接続して 53m まで到達した。
- ② NARREC AP 通常時において、JT-23 は、25m 付近で無線が切れたため、この地点以降、切とした。また、J-6 の 20m 以降 40m までは、通信速度（max）が上昇してそれ以降下降した。原因は、特定できないが、上述のこと（45m で JT-23 を切にして、J-6 が 53m まで到達したこと）も考慮すると、JT-23 を停止することにより相互無線の干渉がなくなったことと、干渉性フェージングのためと推定される。
 （干渉性フェージングの説明は、「無線LANレベル（J-5）測定結果」参照）
- ③ J-6 単独で西側 53m から戻るとき、バックして遠隔操作できたが、西側 30m 付近でバックから正面に向きを換えたとき、無線子機の位置も後ろに変わることから、無線が一時的に途切れたが、マスター側まで戻ることができた。このことから、無線子機の位置でも無線の届く範囲が変わる。（「二. 無線の仕様」に記載されているとおり後方に指向性があるため、正面に向くと無線は、届きにくい）基本的にはバック

で戻ることとする。

【南側】（JT-23：停止中）

- ① 通信速度（max）は、徐々に上昇しているが、これはJ-11と同様のためと推定される。
- ② 25m付近で一時的に低下したが復帰した。これは、マスターと J-6との間に骨の柱やモックアップ階段があるためと推定される。
- ③ 20m、30mの地点では、J-6の画像飛びが認められた。

3. 今後の検討（課題）

- (1) J-6とJT-23は、干渉することなく遠隔操作が可能となるように以下のとおり示す必要がある。

イ. JT-23は、2.4GHz帯を使用しているが、5GHz帯に変更して遠隔操作範囲を確認する。今回の調査実施後、正式なデータは採取しなかったが、干渉することなくJ-6とJT-23は遠隔操作ができた。

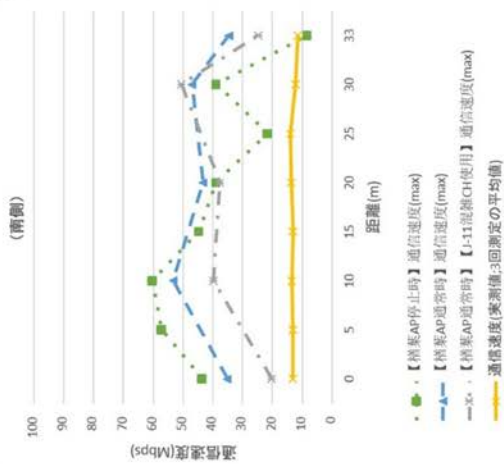
なお、5GHz帯は、2.4GHz帯より無線の届く距離は短くなるため、どの程度の信号強度となるかについても確認する。

ロ. J-6とJT23の無線親機は、ひとつにして2台操作する。今回の調査実施後正式なデータは採取しなかったが、干渉することなくJ-6とJT-23は遠隔操作ができた。この対応で西側 20m付近から通信速度（max）が上昇するかについても確認する。

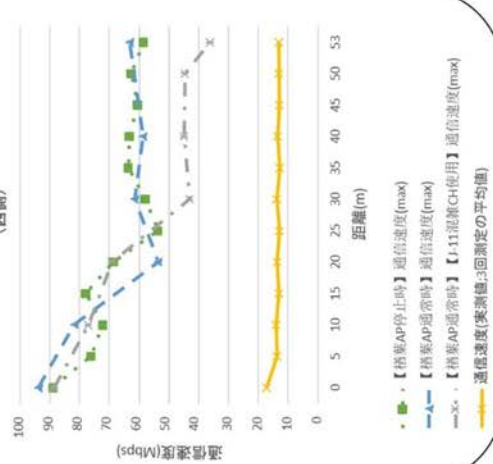
ハ. J-6とJT-23の無線親機及び子機をそれぞれ1台として操作する。そのとき、西側 20m付近から通信速度（max）が上昇するかについても確認する。

- (2) J-5 は、南側の 20m 付近で無線が途切れたが、その原因は、不明である。それを調査するため、無線親機・子機を新型（AP-900/SE-900）に交換して再度確認する。また、西側の 20m～30m についても不安定になるか確認することとする。
- (3) 今までの経験では、鉄骨の柱の間にマスターを設置し、ロボットを遠隔操作したとき、無線が途切れる場合があった。今後、同じ条件で無線 LAN レベルを確認することとする。
- (4) J-11を代表として、無線親機に指向性のあるアンテナ、無線子機に無指向性のアンテナに変更して確認する。
- (5) 無線中継器を使用して、鉄骨の柱付近や水中タンク付近まで無線が届くか確認する。また、無線LANアクセスポイントでネットワークを構築して、そのうちの無線レベルの高いアクセスポイントから信号授受して遠隔操作が可能か確認する。

J-11 通信速度 (受信・最大)



(西側)



「InSSIDer Home」(PC版)の出力結果



西側のデータ

実施日	J-11	距離(m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	53
12/3	J-11	無線LANレベル	61	53	52	50	59	44	42	48	48	45	44	44
		通信速度送信(max)	35.4	32.6	30.6	30.8	28.9	25.5	32.9	34.3	24.4	29.2	28.4	
		通信速度受信(max)	88.9	76.2	72.3	77.9	68.7	53.7	58.1	63.4	60.6	62.7	58.6	
12/5	J-11 (チャンネルそのまま)	無線LANレベル	60	56	56	48	48	50	50	53	53	52	50	
		通信速度送信(max)	37.8	39	39	34.9	34.9	32.1	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	
		通信速度受信(max)	93.8	81.8	81.8	53.7	53.7	61.6	61.6	58.8	58.8	58.8	63.3	
12/5	J-11 (チャンネル混雑)	無線LANレベル	60	51	51	47	47	44	44	44	44	44	44	
		通信速度送信(max)	34.7	33.3	33.3	34	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	29.4	22.3
		通信速度受信(max)	88.6	77.1	77.1	69.2	69.2	43.1	43.1	45	45	44.7	38.3	

南側のデータ

実施日	J-11	距離(m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	53
12/3	J-11	無線LANレベル	37	40	47	50	47	50	47	39	36	36	39	
		通信速度送信(max)	28.4	28.2	30.5	30.7	33	33	33	33	40.1	0.315		
		通信速度受信(max)	43.7	57.3	60.4	44.8	39	39	39	21.7	38.9	8.33		
12/5	J-11 (チャンネルそのまま)	無線LANレベル	46	39	39	30.7	35.9	35.9	35.9	31.2	31.2	0.944		
		通信速度送信(max)	35.2	53.3	53.3	43.3	43.3	43.3	43.3	34.7	34.7	34.7	39	
		通信速度受信(max)	38	44	44	41	41	41	41	30.1	29.8	35.1		
12/5	J-11 (チャンネル混雑)	無線LANレベル	29.4	25.7	25.7	38.8	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	24.7
		通信速度送信(max)	20.3	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8

【考察】

1. 結果センターの無線LANの通常(使用)状態と停止状態において、J-11の通信状態は、大きな差がなかった。
2. マスターとJ-11の距離が徐々に大きくなることにより、J-11の通信速度(max)は、徐々に下がった。しかし、20~30m付近から少し上昇が一時的であった。これは、フィルタリングにより、無線LANの特性により、無線LANの通信速度は、一定になる可能性がある。
3. 混雑チャンネルを使用した場合、マスターとJ-11の距離が30m付近から影響が出始めた。

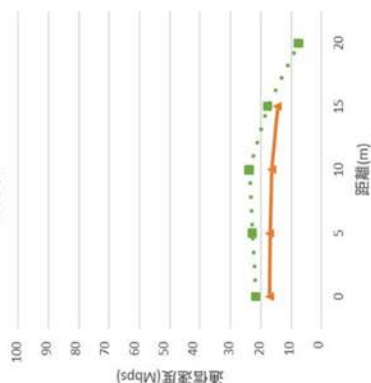
【南側】

1. 結果センターの無線LAN停止において、マスターとJ-11の距離が25mと33mで通信速度が低くなった原因としては、マスターとJ-11との間に鉄骨の柱やモックアップ階段による影響があるためと推定される。また、25mについては、結果センターの無線LANを停止している通信速度は低くなっているが、通常状態での測定は、実施していないため、通常状態も同様な状態になったと考えられる。
2. 徐々に通信速度が高くなっていくが、J-11についても同様な傾向であるため、横向きによるアンテナの指向性が関係していると推定される。

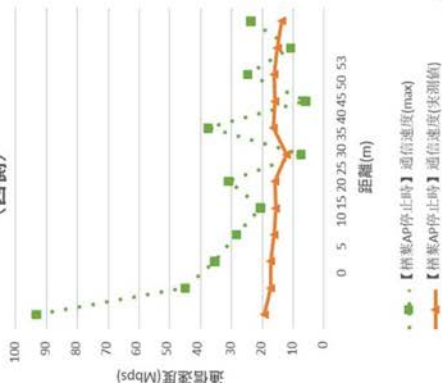
無線LANレベル(J-11)測定結果

J-5 通信速度(受信・最大)

(南側)



(西側)



「nssidder Home」(PC版)の出力結果



J-5 (西側) 5m付近で通信センサAP停止とした状態で計測
・25m付近で停止
・他の無線LANチャネルと重なっていない。

J-5 西側のデータ

実施日		距離(m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	53
12/3	J-5	無線LANレベル	60	52	48	44	39	44	43	43	43	41	43	40
		通信速度送信(max)	48.4	30.8	25.7	22.2	23.5	0.73	31.5	1.15	15.5	15.2	20	
		通信速度受信(max)	93.4	45.1	35.5	28.4	20.6	31	7.44	37.6	5.95	24.8	10.8	23.8

J-5 南側のデータ

実施日		距離(m)	0	5	10	15	20	25	30	33
12/3	J-5	無線LANレベル	48	48	49	43				
		通信速度送信(max)	17.9	19.9	16.9	1.99	1.15			
		通信速度受信(max)	21.7	22.8	23.8	17.8	7.6			

【考察】

1. 西側は、マスターとJ-5の距離が徐々に大きくなることにより、J-5の通信速度(max)は、徐々に下がった。また、通信速度(実測値)のうち、途中で増減していたところ、20～30m付近では、通信速度が上下(0～16Mbps)して不安定であったが、53mまで到達した。
2. 西側30m、35m、40mの地点では、通信速度(max)の上下があった。無線LANレベルでは、少し下がったが、ほぼ一定であった。原因の特定は、出来ないが、反射波の影響による干渉性フェージング*によるものと推定される。
3. 南側において、他のロボット通信速度(max)は、顕著な上昇が認められなかった。理由として考えられることは、無線LANレベルの取付け位置が他のロボットと違うためと推定される。
4. 南側の20m付近の地点以降は、無線LANレベルを受信できなかったため、実測は、中止した。

*干渉性フェージング: 送信機から受信機に至る伝搬経路が複数あり、その経路の間に遅延差が生じる。例えば、経路が異なる場合、一つは、直接アンテナに届くが、他の一つは、柱等による反射波がアンテナに届く。このように、伝搬経路が異なるため、遅延差が生じる。

無線LANレベル(J-5)測定結果

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「 Δ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

