

ものづくり企業のAI・IoT活用促進事業 - 通信障害に強い無線通信ネットワーク開発事業

# 通信障害に強い無線通信ネットワークの 製造現場適用化研究

電子・機械技術部  
南相馬技術支援センター

電子・情報科  
機械加工ロボット科

○柿崎 正貴、三瓶 史花、鈴木 健司、山田 昌幸  
三浦 勝吏

## 【工場内の通信インフラ（情報ネットワーク）の課題】

### ○ 無線LAN（Wi-Fi）

《メリット》 機器整備が容易（ルータを設置するだけ）

《デメリット》 電波到達距離が短い（通信範囲が限定）  
電波遮蔽・電波干渉に弱い（通信が不安定）

### ○ 有線LAN（ケーブル敷設）

《メリット》 通信の安定性・信頼性が高い、高速通信が可能

《デメリット》 容易に敷設できない  
（工場内の機器配置変更や製造ライン再編成が必要）

## 【工場内の通信インフラ（情報ネットワーク）の課題】

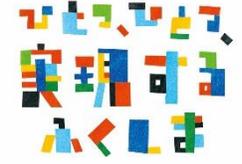
### 920MHz特定小電力無線（LPWA）が注目されている

- 【特徴】 長距離通信（1km以上）、電波遮蔽や干渉に強い  
通信規格・ハードウェアの選択肢が多い  
規格によって長所・短所がある（通信距離・データレートも様々）

### 目的

- ① 工場のような**障害物のある環境のLPWA通信信頼性を評価**  
→ 最適な無線を選ぶための指針（判断材料）を得る
- ② **LPWA無線通信IoTシステムを構築、実際の製造現場へ導入**  
→ システム安定性の評価、導入効果検証





# ① 性能評価

# ① 性能評価（Wi-Fi HaLow）

## 【障害物の無い環境における電波伝搬特性】

- ◆ 送信機から受信機へデータ送信  
→ 受信機の受信信号強度（RSSI[dBm]）を測定
- ◆ 通信距離 : 50[m]間隔で最大400[m]まで  
(±10[cm]、±20[cm]も測定)
- ◆ アンテナ高さ : 6.0[m]、1.8[m]
- ◆ 帯域幅 : 4MHz
- ◆ 接続 : EVKit+RasPiにホストPCからLAN接続
- ◆ 測定方法 : iwコマンド実行 → RSSI[dBm]取得

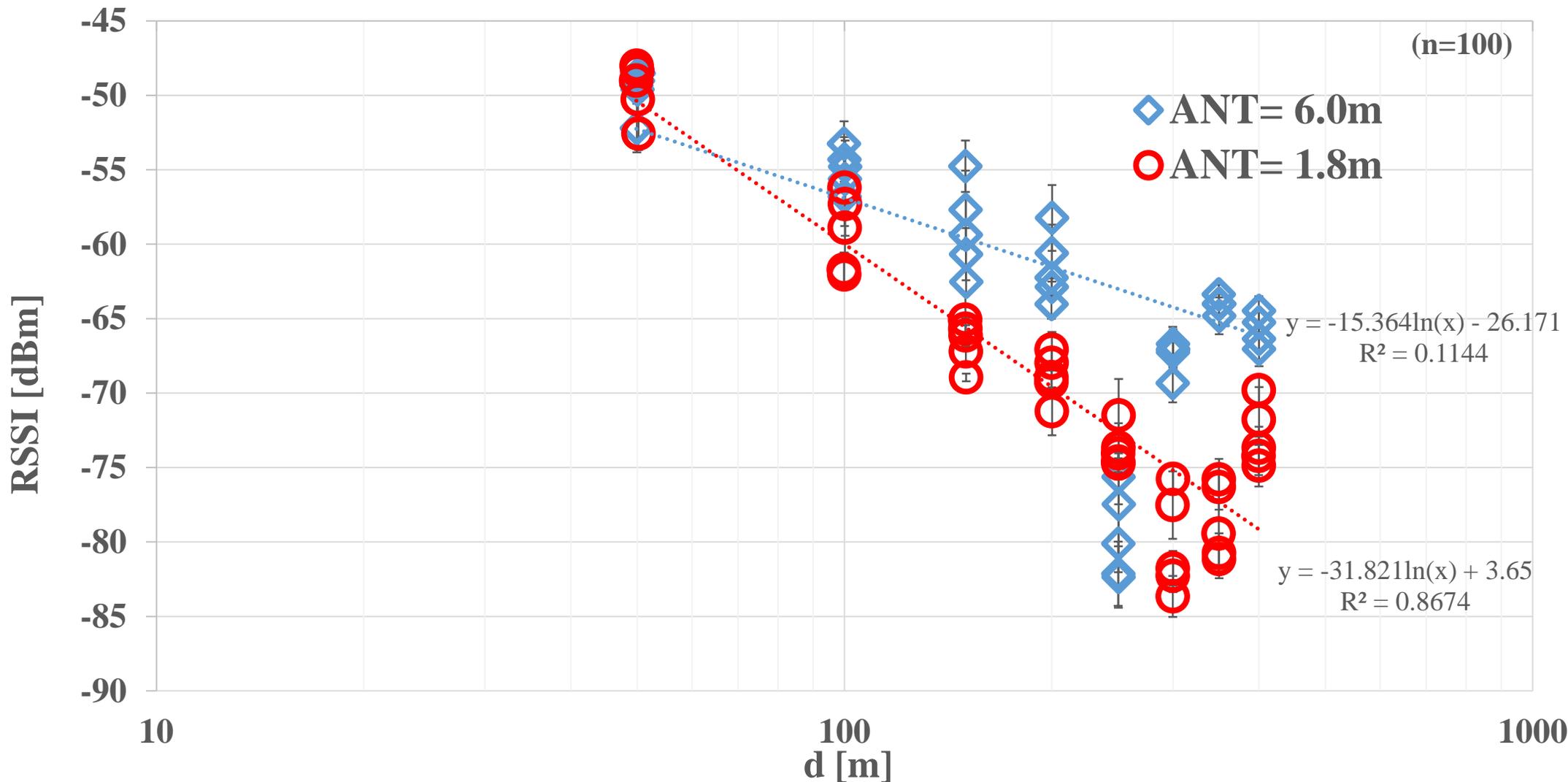


Wi-SUN FANとWi-Fi HaLowの電波伝搬特性を比較  
→ 通信規格の違いによる電波伝搬特性の差異を調査



# ① 性能評価 ( Wi-Fi HaLow )

## 【障害物の無い環境における電波伝搬特性】



● 電波伝搬損失

$$L[\text{dBm}] = l_1 \cdot 20\log(d) + l_2 \cdot 20\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)$$

$$= \alpha \log(d) + \beta$$

送受信アンテナ間距離 :  $d[\text{m}]$   
 波長 :  $\lambda[\text{m}]$  (定数)  
 大地吸収等の減衰係数 :  $l_1, l_2$

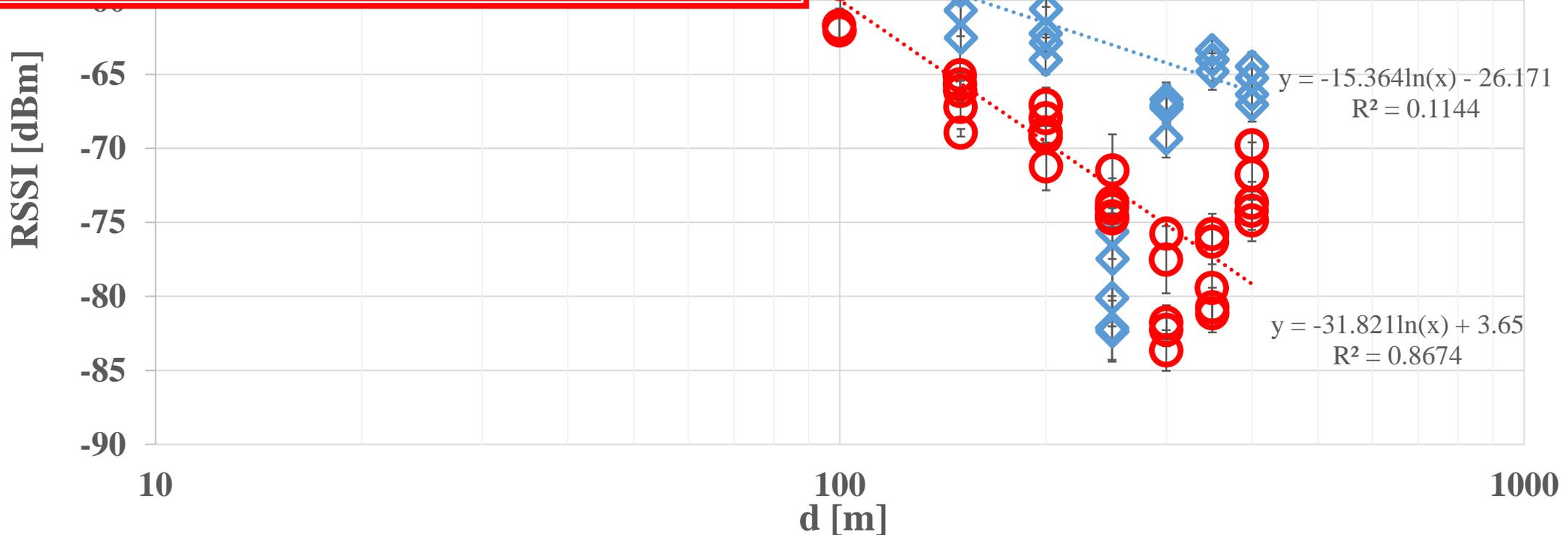
【電波強度の距離減衰特性】

アンテナ高さ6.0[m]:

$$L = -15.36 \log(d) - 26.17$$

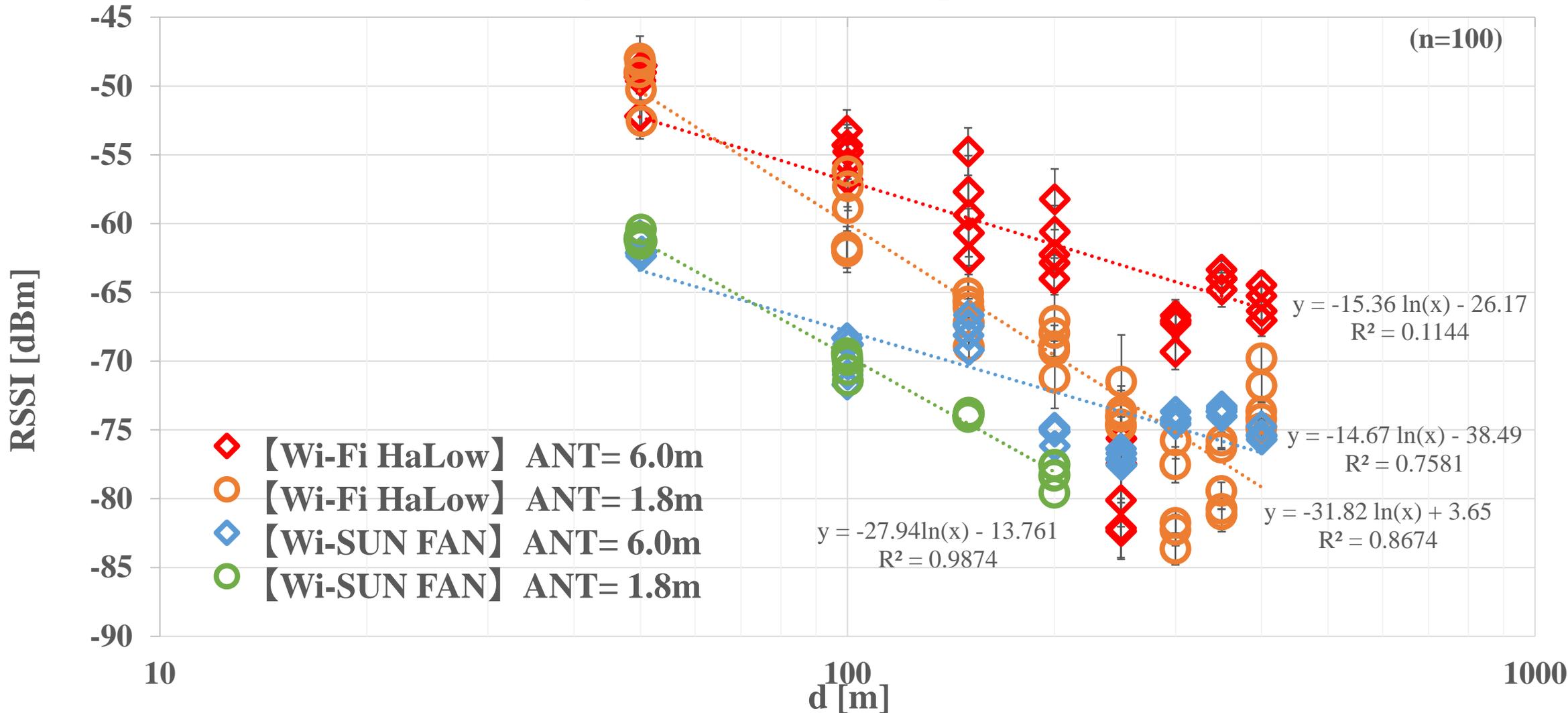
アンテナ高さ1.8[m]:

$$L = -31.82 \log(d) + 3.65$$



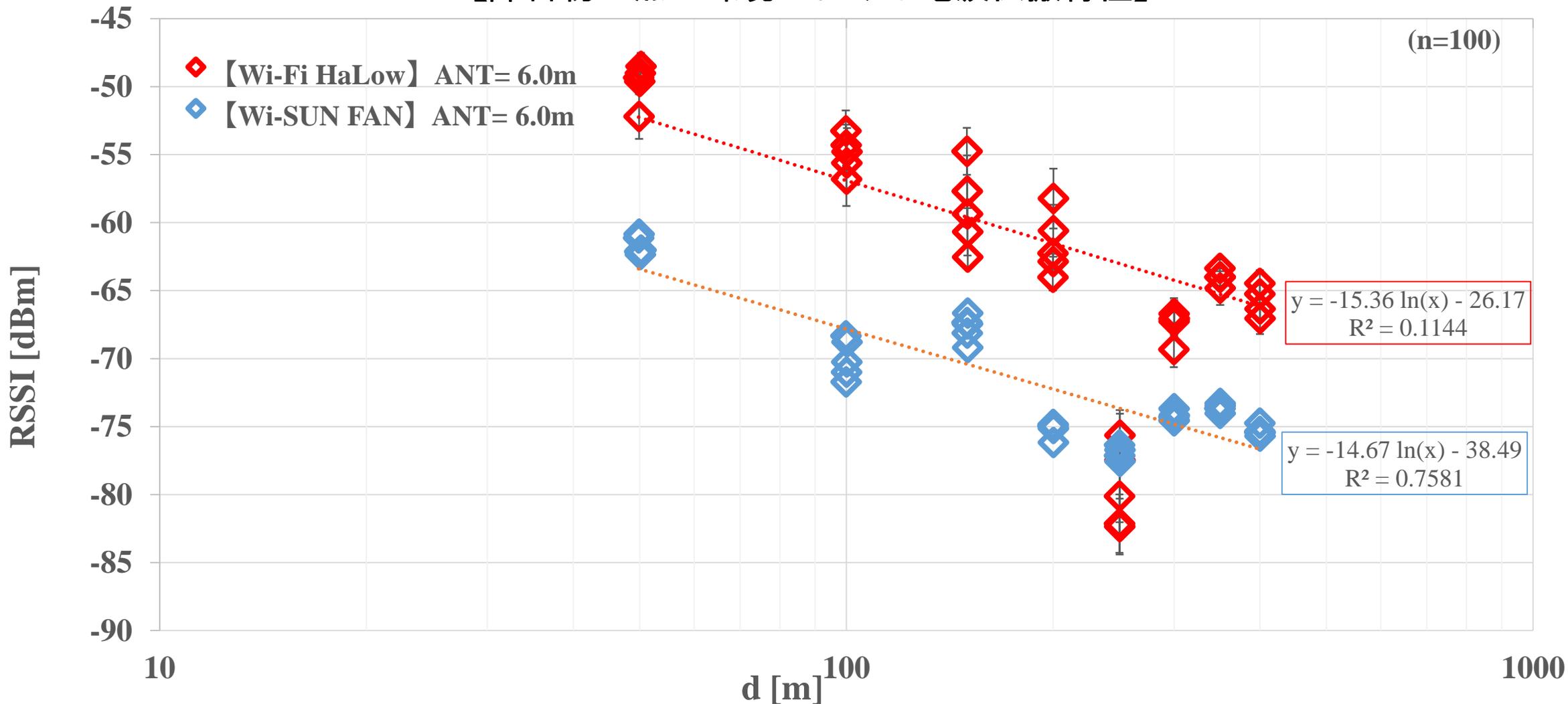
# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN / Wi-Fi HaLow )

【障害物の無い環境における電波伝搬特性】



# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN / Wi-Fi HaLow )

## 【障害物の無い環境における電波伝搬特性】



# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN / Wi-Fi HaLow )

## 【結果】

- ◆ 電波強度の距離減衰率  $\alpha$  が同様の傾向

【Wi-SUN FAN】  $\alpha = -14.67$

【Wi-Fi HaLow】  $\alpha = -15.36$

## 【考察】

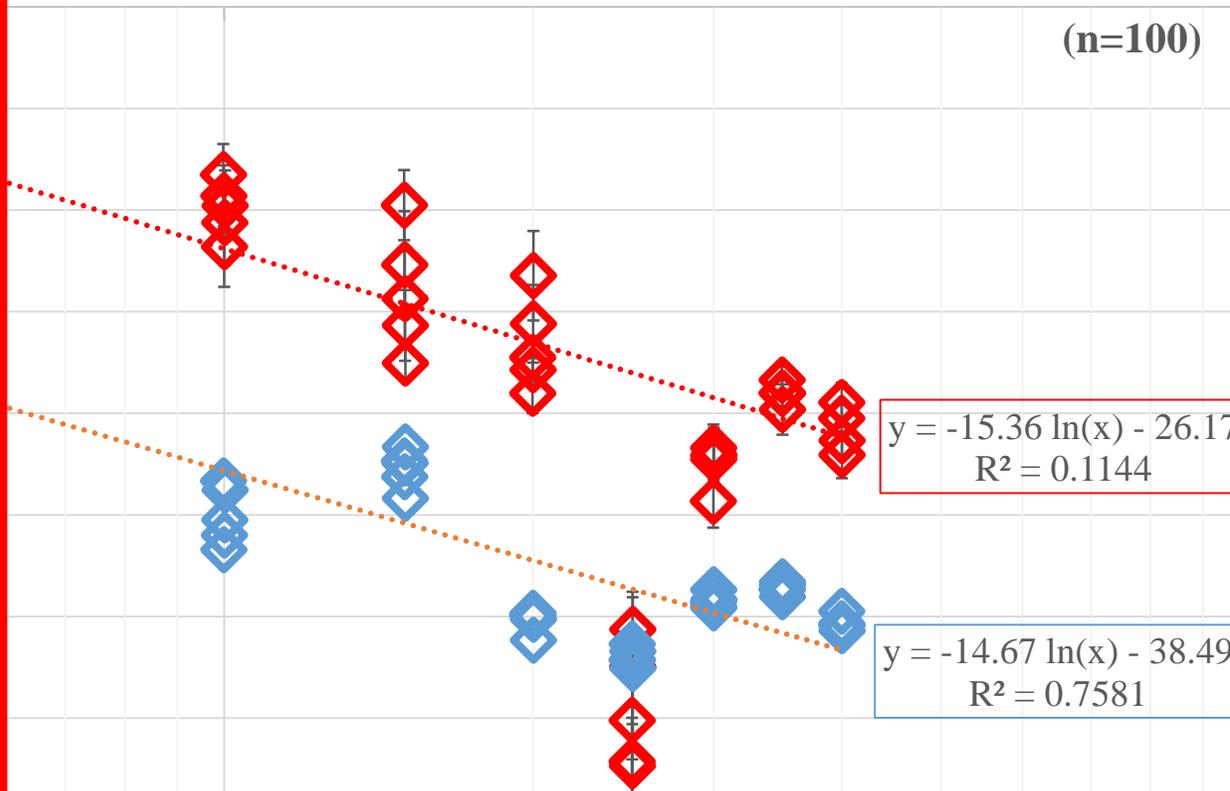
- ◆ 両規格ともに、920MHz帯の搬送波  
→ 電波減衰率は**搬送波の影響大**  
(変調方式の違いは影響しない)



- ✓ LPWAの電波伝搬特性は、**通信規格の違いによる影響は非常に小さい**

→ 障害物に対する電波減衰特性も  
通信規格による違いは無いのか？

## 環境における電波伝搬特性】

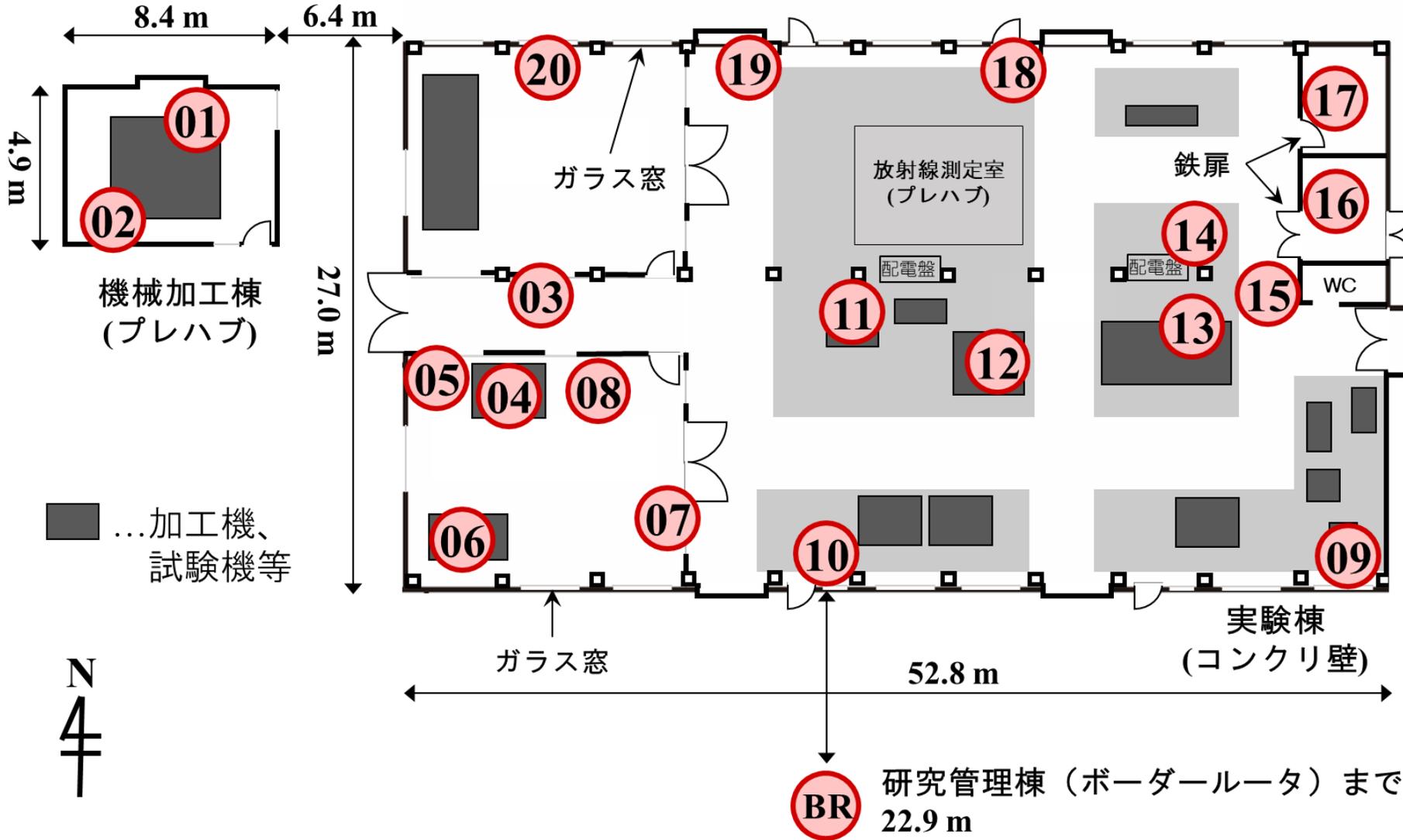


## 【今後】

障害物のある環境における電波伝搬特性を評価  
(機器に遮られた場所、建屋間の通信等)

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



- ◆ ハイテクプラザ実験棟に20個のノード設置
- ◆ 別棟のBR (親機) までデータ送信
- データレート : 50[kbps]
- パケット : 32bit UDP
- 送信時間間隔 : 1[s]

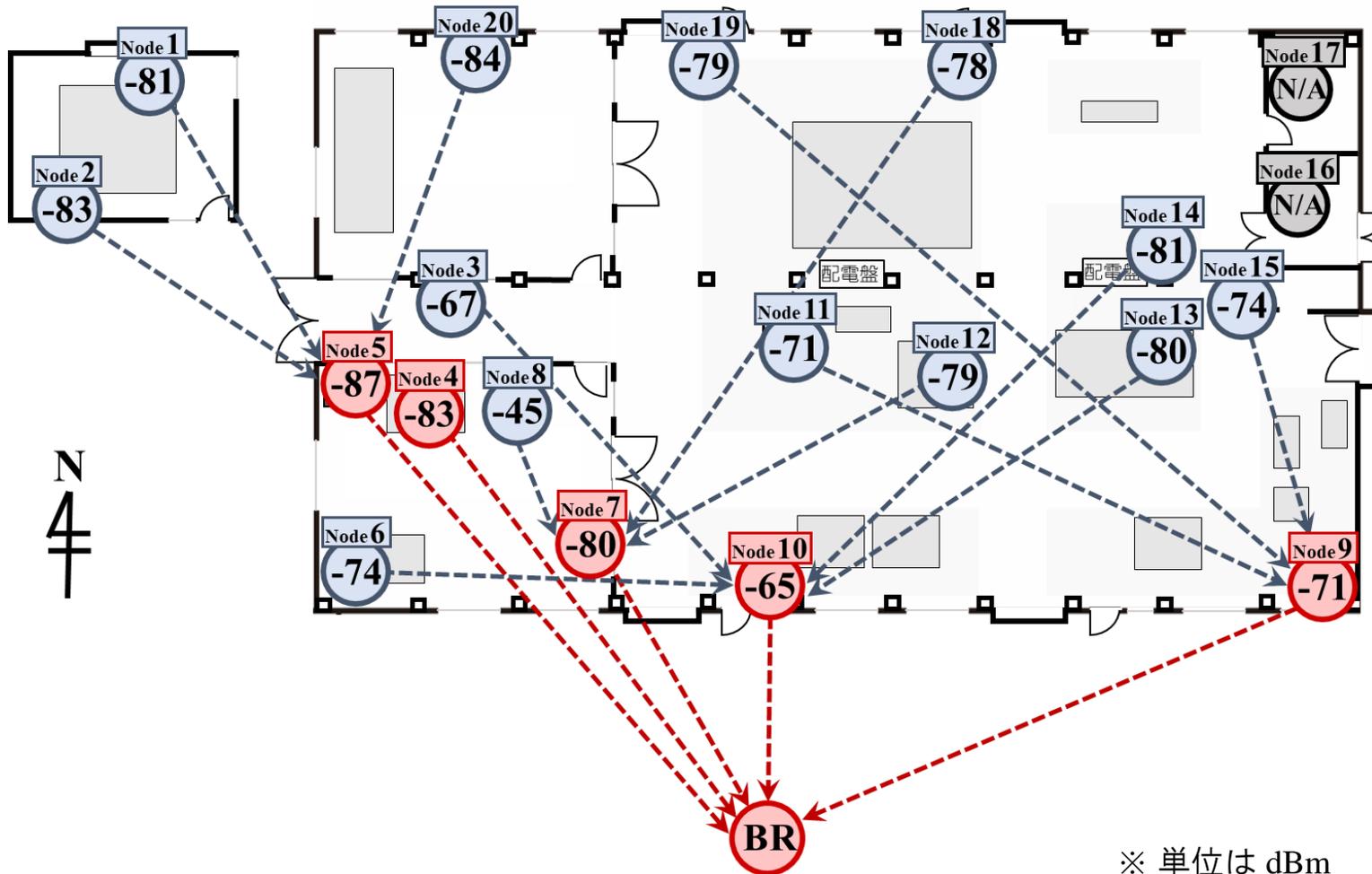


- ✓ 通信経路
- ✓ RSSI [dBm]
- ✓ PER [%] を測定

※ PER : パケットエラーレート

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



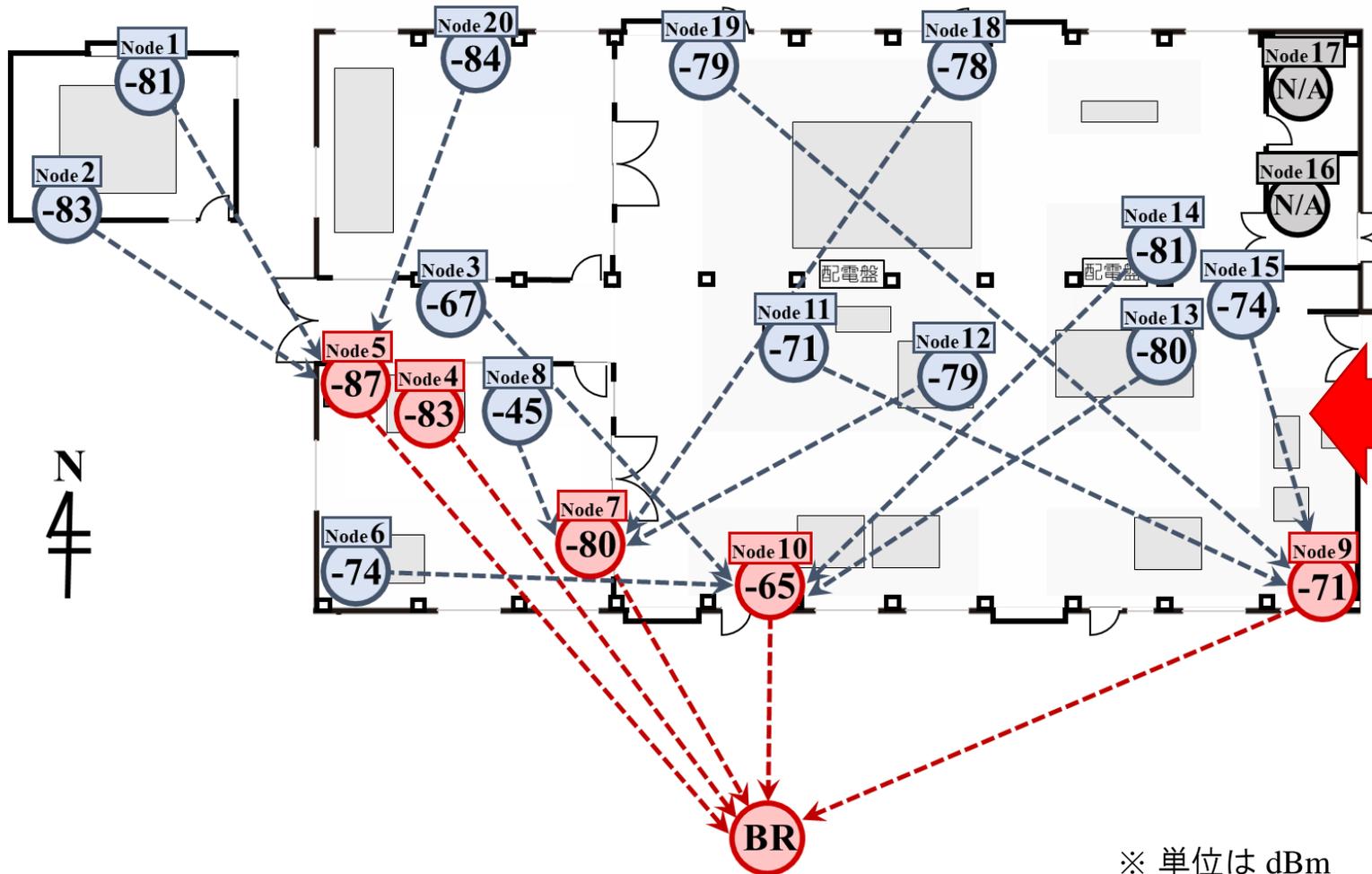
【通信経路・RSSI[dBm]】

ノード番号	PER[%]	RSSI[dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ボーダールータ	0
5	100.0%	-87.3	ボーダールータ	3
6	64.4%	-73.7	中継ノード	
7	3.7%	-79.9	ボーダールータ	3
8	18.0%	-45.1	中継ノード	
9	16.6%	-71.2	ボーダールータ	3
10	3.8%	-64.9	ボーダールータ	4
11	19.4%	-71.1	中継ノード	
12	100.0%	-79.1	中継ノード	
13	33.8%	-79.9	中継ノード	
14	51.8%	-81.0	中継ノード	
15	19.9%	-74.3	中継ノード	
16	100.0%	N/A		
17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

【各ノードの PACKET エラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



ノード番号	PER[%]	RSSI[dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ボーダールータ	0
5	100.0%	-87.3	ボーダールータ	3

### 【通信経路】

ルーティングプロトコルRPLにより  
自動生成(最適化)された経路

中継するノード数を均等に分配  
→ トラフィック負荷分散

17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

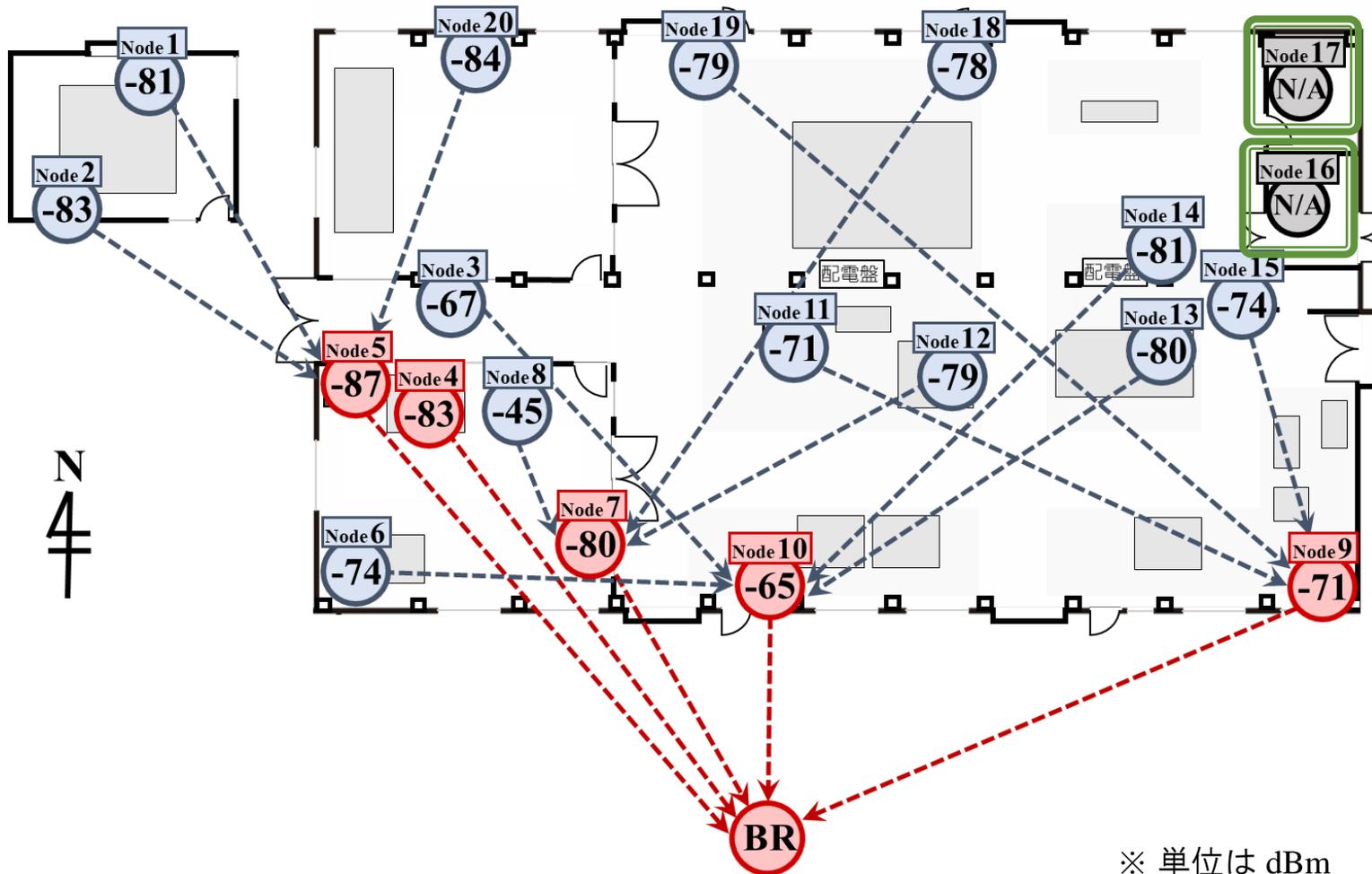
【通信経路・RSSI[dBm]】

※ 単位は dBm

【各ノードの packets エラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



【通信経路・RSSI[dBm]】

【 RSSI / PER 】

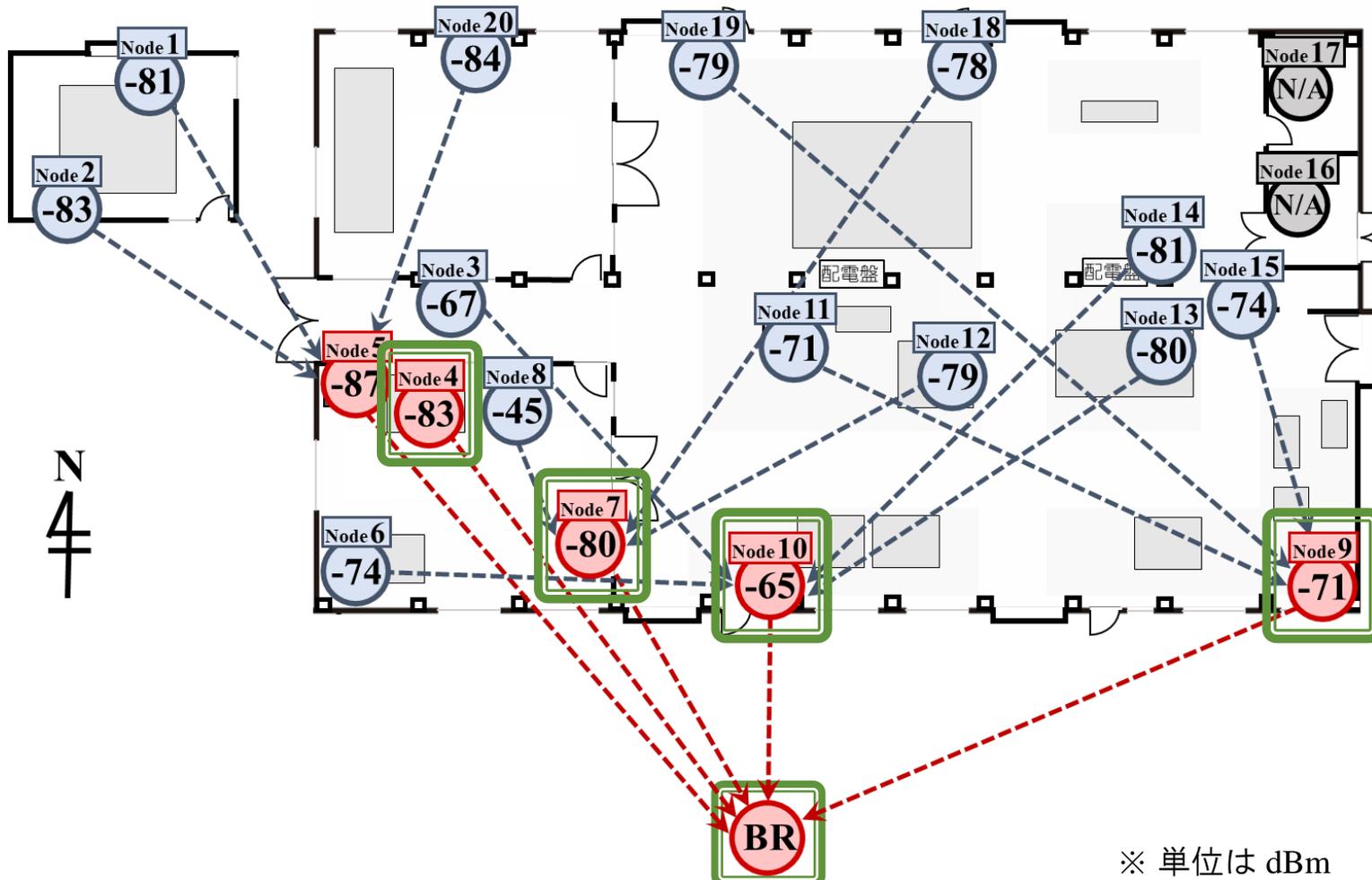
◆ コンクリート壁と鉄製扉で囲まれた部屋のノード  
→ 電波遮蔽により通信不可

ノード数	パーセンテージ	RSSI [dBm]	ノードタイプ	ノード数
8	18.0%	-45.1	中継ノード	
9	16.6%	-71.2	ボーダールータ	3
10	3.8%	-64.9	ボーダールータ	4
11	19.4%	-71.1	中継ノード	
12	100.0%	-79.1	中継ノード	
13	33.8%	-79.9	中継ノード	
14	51.8%	-81.0	中継ノード	
15	19.9%	-74.3	中継ノード	
16	100.0%	N/A		
17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

【各ノードの Paket エラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



【通信経路・RSSI[dBm]】

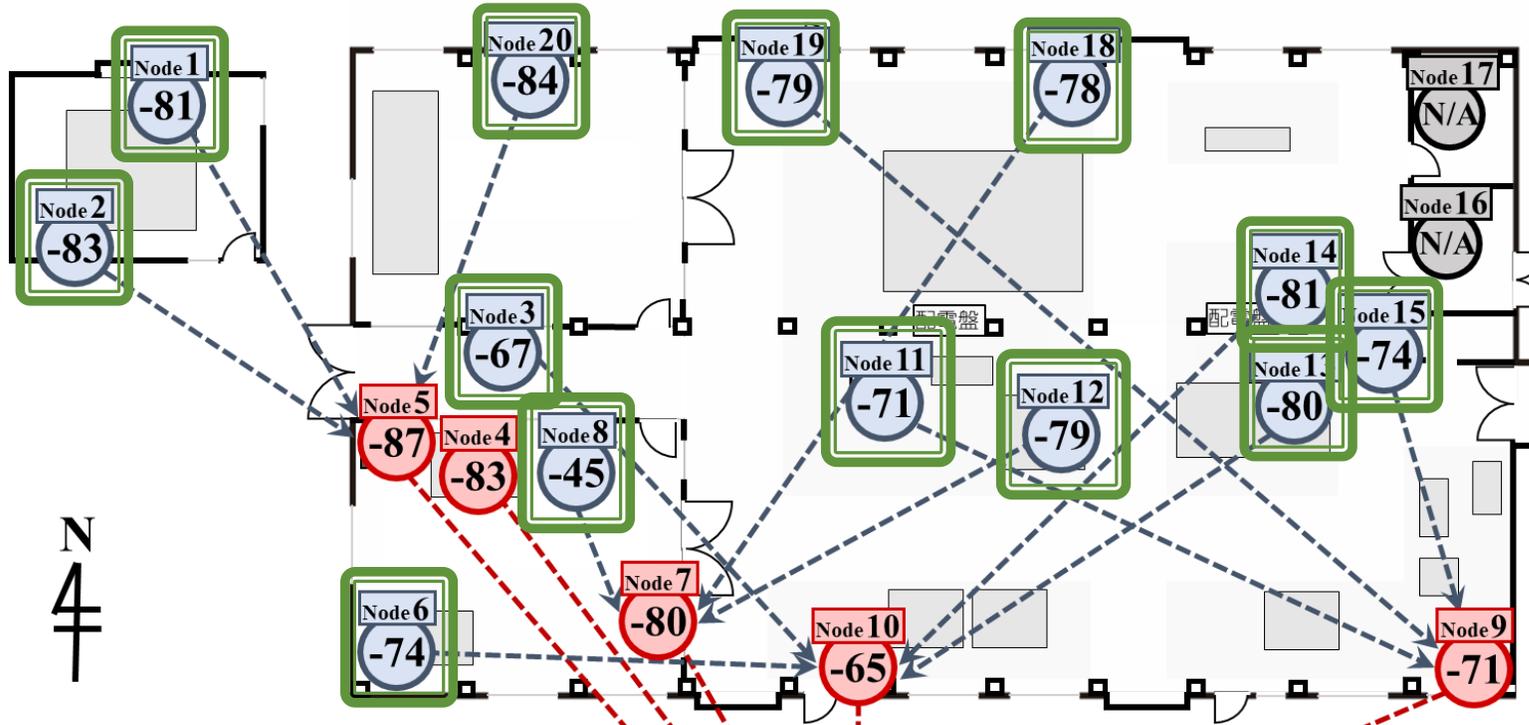
ノード番号	PER[%]	RSSI[dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ポータルルータ	0
5	100.0%	-87.3	ポータルルータ	3
6	64.4%	-73.7	中継ノード	
7	3.7%	-79.9	ポータルルータ	3
8	18.0%	-45.1	中継ノード	
9	16.6%	-71.2	ポータルルータ	3
10	3.8%	-64.9	ポータルルータ	4
11	19.4%	-71.1	中継ノード	
12	100.0%	-79.1	中継ノード	

**【 RSSI / PER 】**  
 ◆ BRと直接通信するノード  
 → PER[%]が小さい  
 (通信が良好)

【各ノードの.packetエラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



ノード番号	PER[%]	RSSI[dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ホータールータ	0
5	100.0%	-87.3	ポータールータ	3
6	64.4%	-73.7	中継ノード	
7	3.7%	-79.9	ホータールータ	3
8	18.0%	-45.1	中継ノード	
9	16.6%	-71.2	ホータールータ	3
10	3.8%	-64.9	ポータールータ	4
11	19.4%	-71.1	中継ノード	
12	100.0%	-79.1	中継ノード	
13	33.8%	-79.9	中継ノード	
14	51.8%	-81.0	中継ノード	
15	19.9%	-74.3	中継ノード	
16	100.0%	N/A		
17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

### 【 RSSI / PER 】

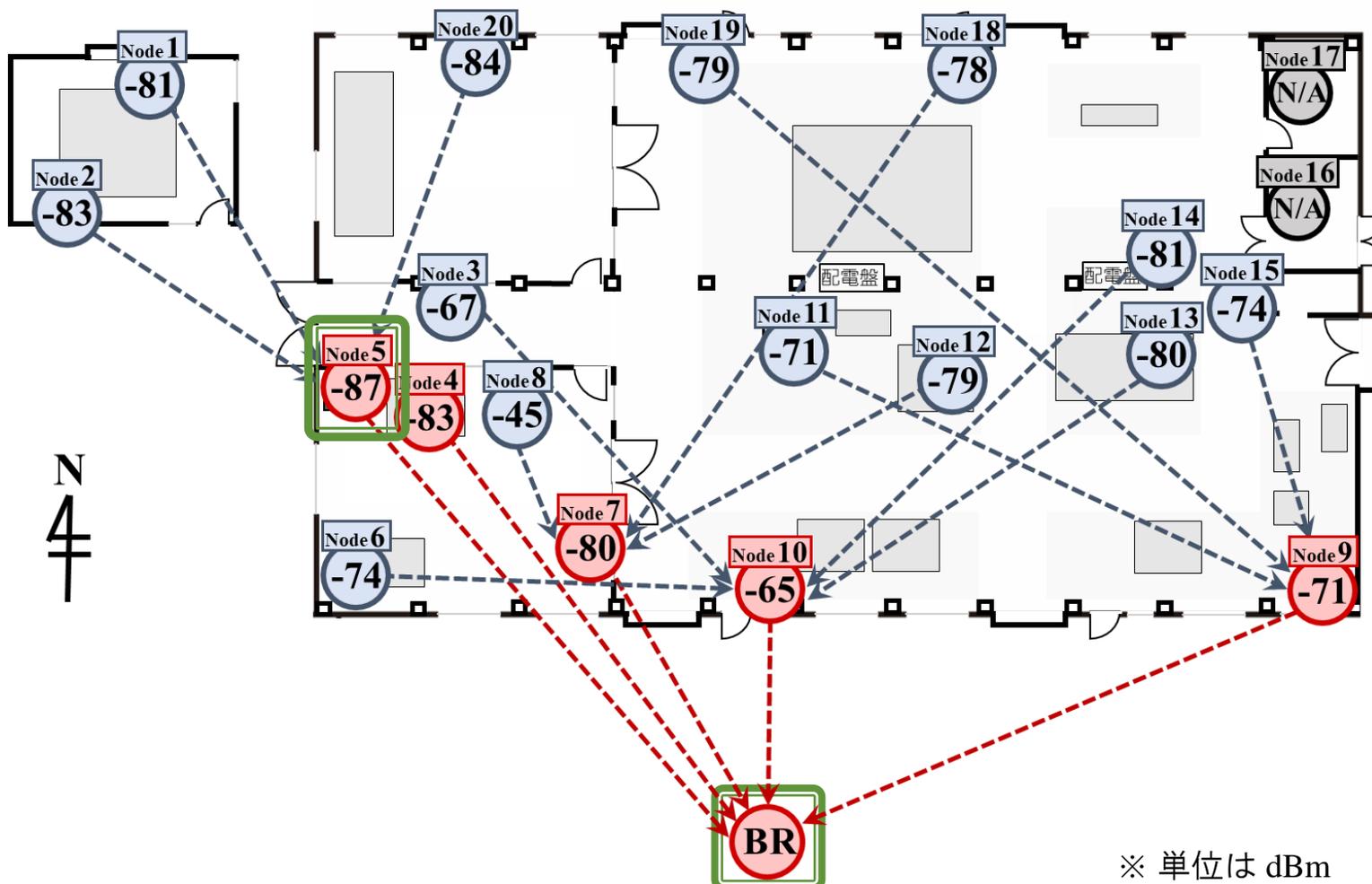
- ◆ ノードを中継する場合  
→ PER[%]が大きい  
(通信が悪化)

【通信経路・

【各ノードの packets エラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



【通信経路・RSSI[dBm]】

ノード番号	PER[%]	RSSI[dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ボーダールータ	0
5	100.0%	-87.3	ボーダールータ	3
6	64.4%	-73.7	中継ノード	

**【 RSSI / PER 】**

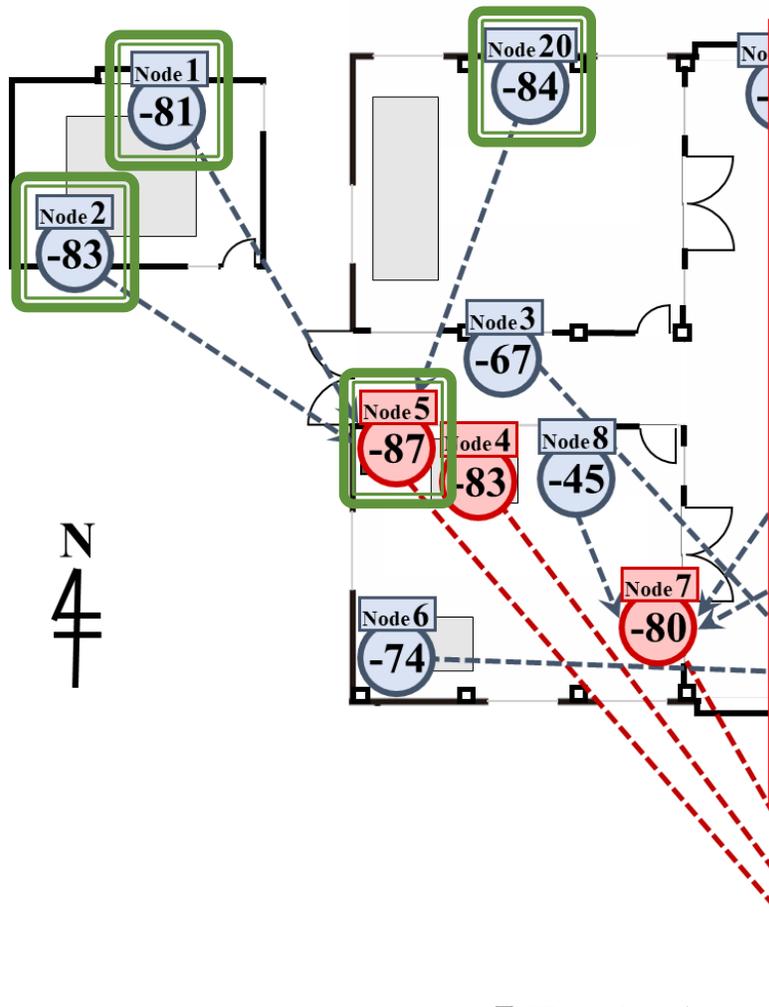
◆ RSSI[dBm] が低い  
→ PER[%] が大きくなる  
(通信が悪化)

15	19.9%	-74.5	中継ノード	
16	100.0%	N/A		
17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

【各ノードの пакет エラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



### 【 RSSI / PER 】

- ◆ PER[%]が大きいノードを中継するノード  
→ PER[%]が大きい (通信が悪化)
- ◆ 理想的な環境では、RSSI = -88[dBm]のとき PER = 0[%]  
→ トラフィック輻輳により通信性能低下

※ 単位は dBm

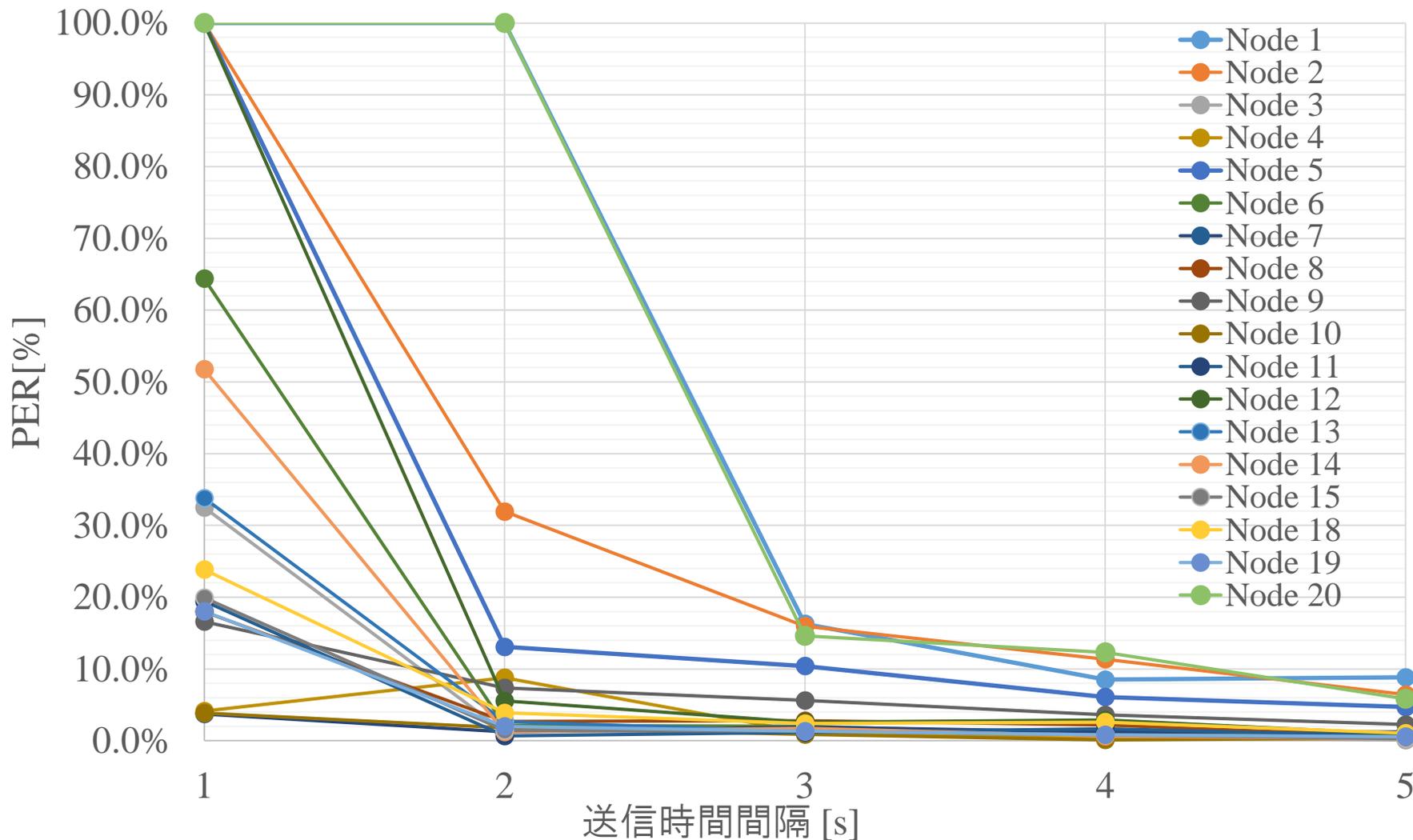
ノード番号	PER[%]	RSSI[dBm]	データ送信先	中継ノード数
1	100.0%	-80.8	中継ノード	
2	100.0%	-83.1	中継ノード	
3	32.5%	-66.7	中継ノード	
4	4.1%	-83.3	ボーダールータ	0
5	100.0%	-87.3	ボーダールータ	3
6	64.4%	-73.7	中継ノード	
7	3.7%	-79.9	ボーダールータ	3
8	18.0%	-45.1	中継ノード	
9	16.6%	-71.2	ボーダールータ	3
10	3.8%	-64.9	ボーダールータ	4
11	19.4%	-71.1	中継ノード	
12	100.0%	-79.1	中継ノード	
13	33.8%	-79.9	中継ノード	
14	51.8%	-81.0	中継ノード	
15	19.9%	-74.3	中継ノード	
16	100.0%	N/A		
17	100.0%	N/A		
18	23.8%	-77.8	中継ノード	
19	18.0%	-78.7	中継ノード	
20	100.0%	-84.0	中継ノード	

【通信経路・RSSI[dBm]】

【各ノードの пакет エラーレート】

# ① 性能評価 ( Wi-SUN FAN )

## 【実環境における電波伝搬特性】



◆ データ送信時間間隔を  
1[s]~5[s]まで変化

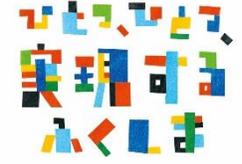


◆ 3[s]から全ノード疎通

◆ 5[s]では PER<10[%]

## 【今後】

◆ これらの知見を  
実証実験へ応用  
→ システム最適化

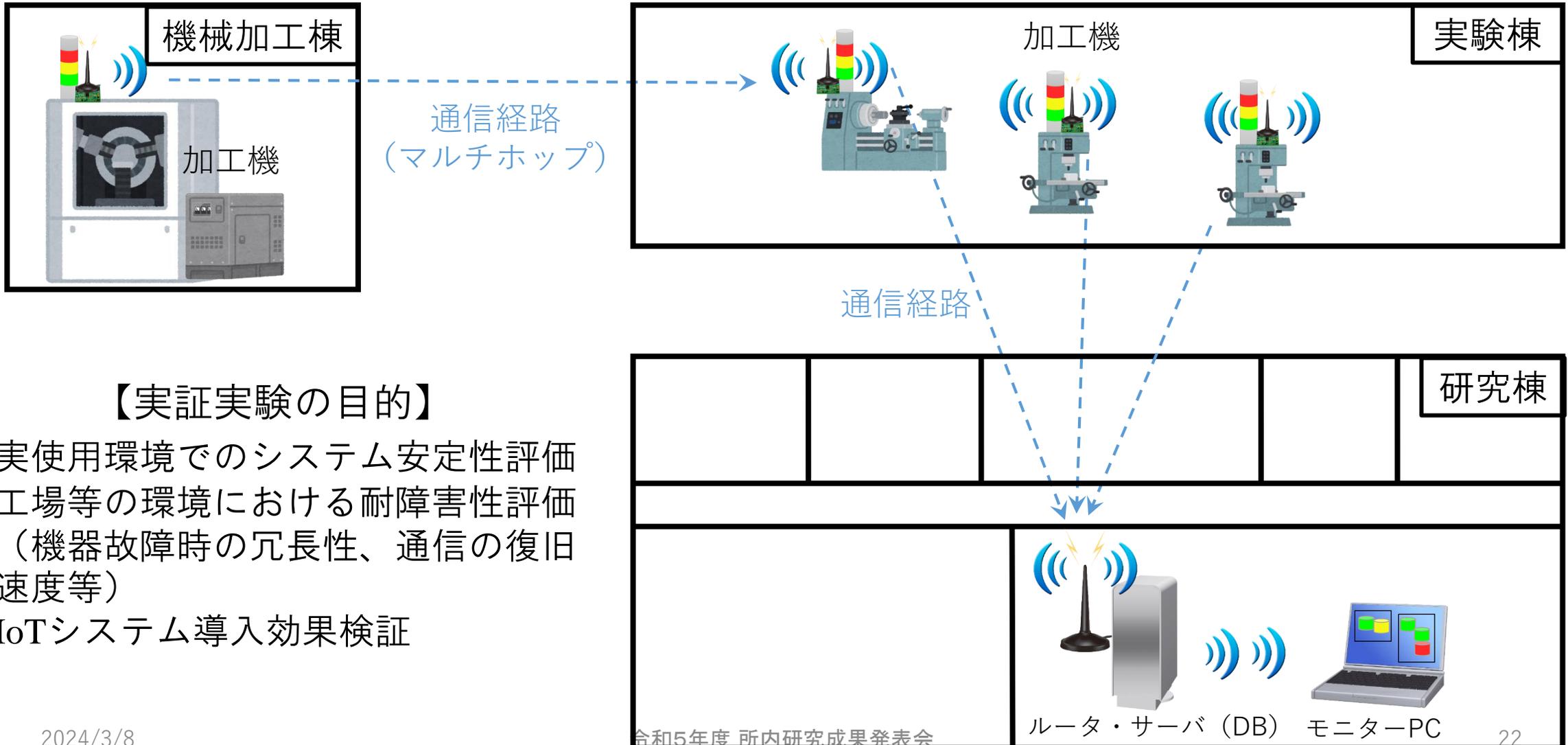


## ② 実証実験

## ② 実証実験

### 【加工機稼働監視のための無線通信IoTシステム】

ハイテクプラザ敷地内

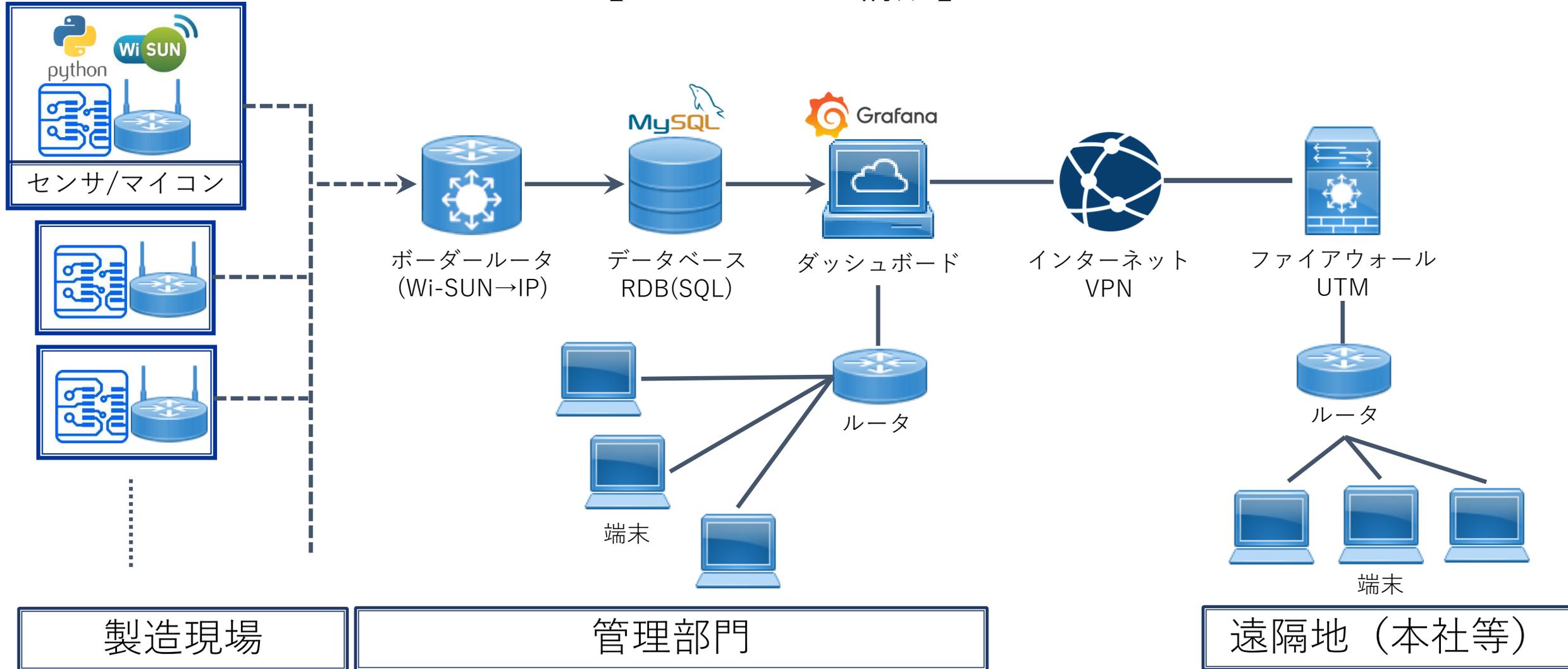


### 【実証実験の目的】

- ◆ 実使用環境でのシステム安定性評価
- ◆ 工場等の環境における耐障害性評価  
(機器故障時の冗長性、通信の復旧速度等)
- ◆ IoTシステム導入効果検証

## ② 実証実験

### 【IoTシステム構成】



## ② 実証実験

### 【IoTシステム構成】



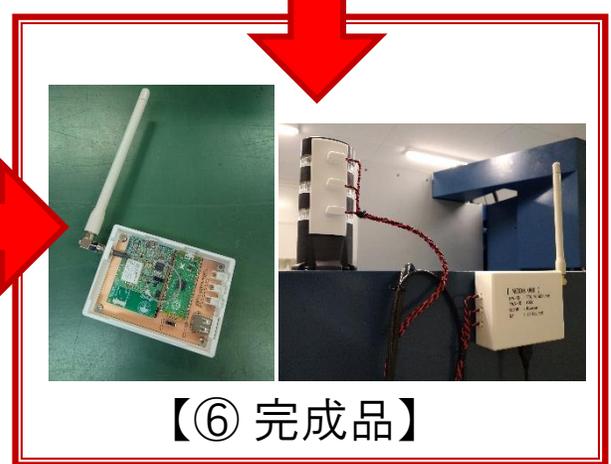
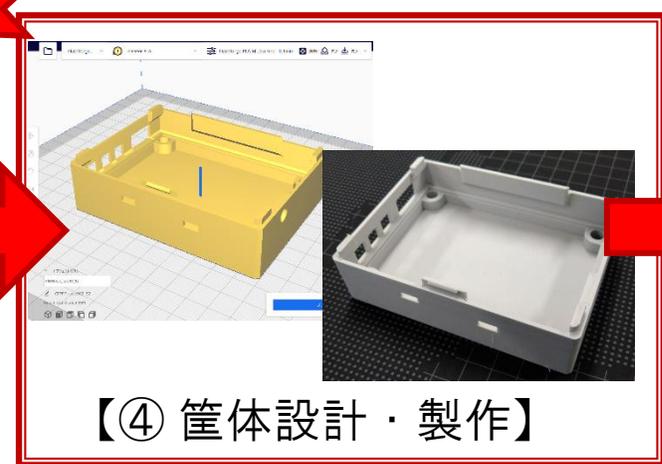
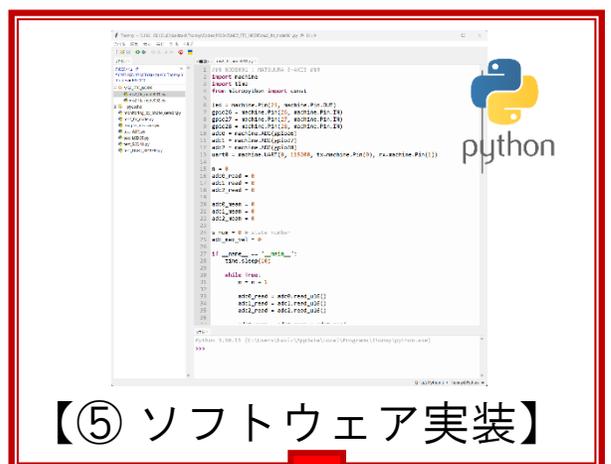
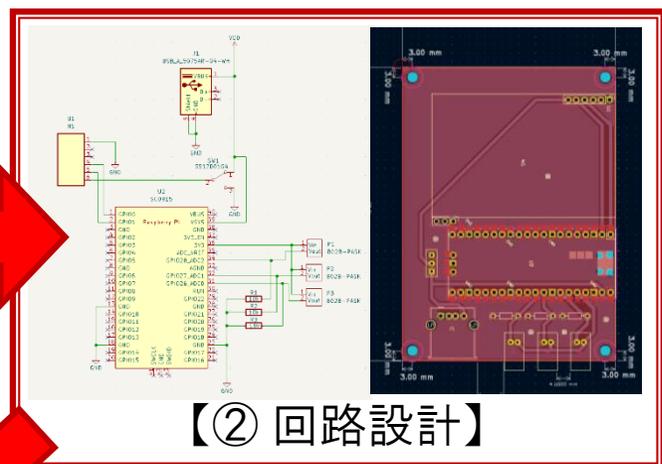
python Wi SUN



センサ/マイコン



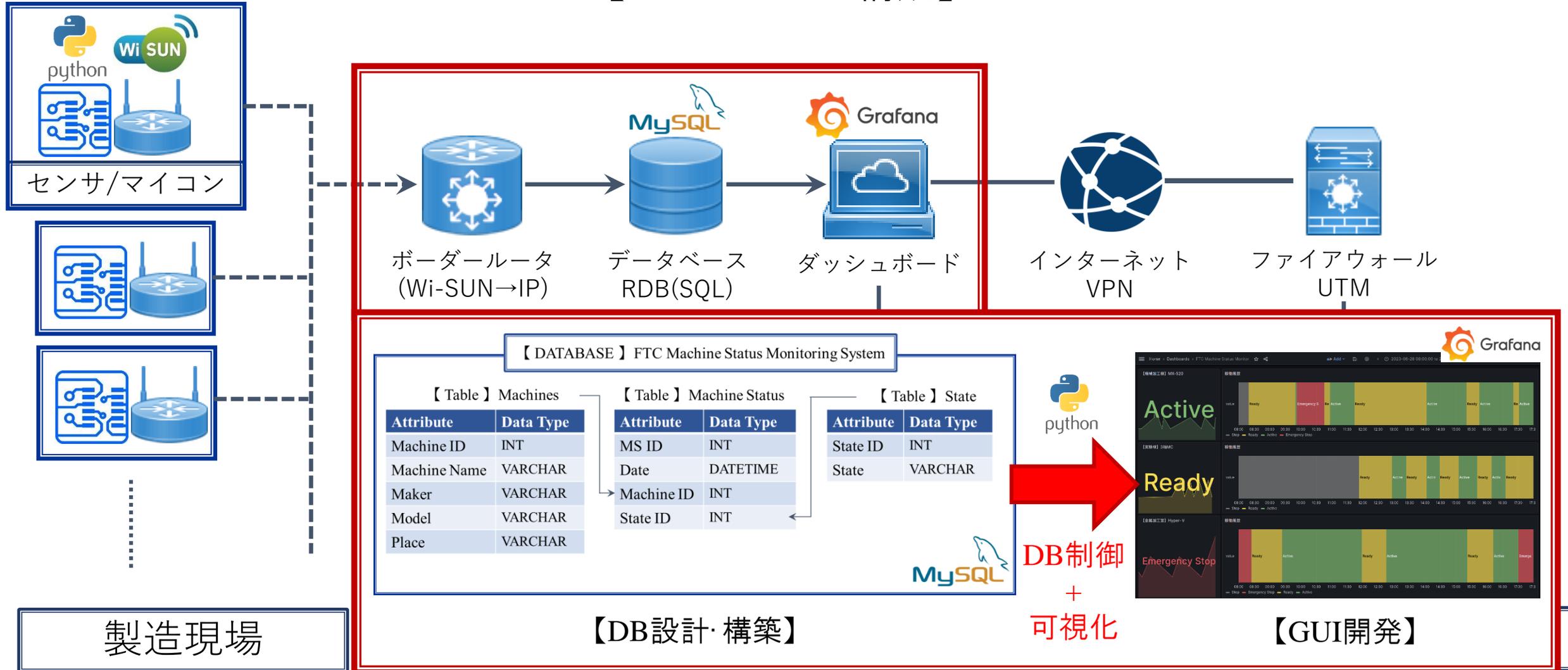




製造現場

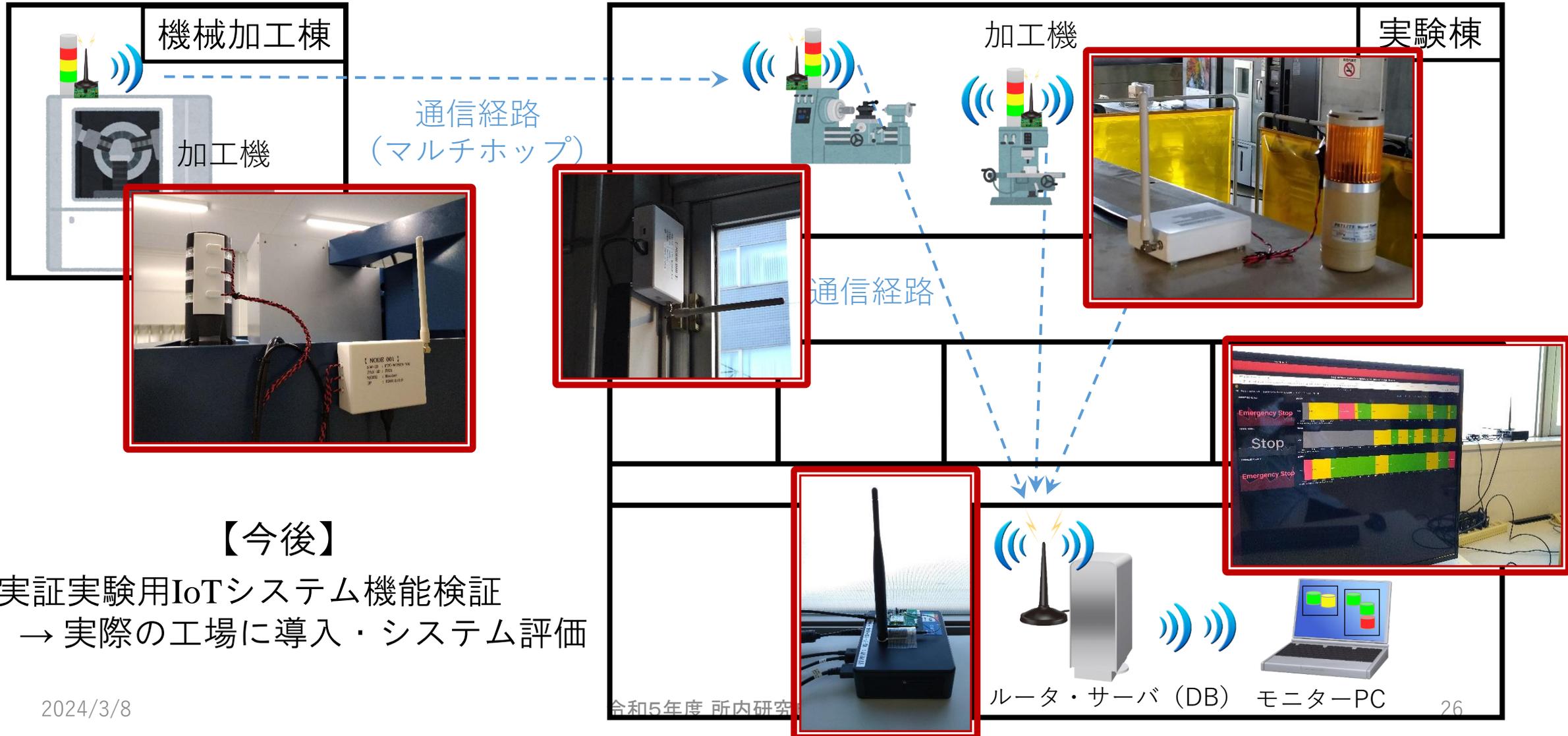
## ② 実証実験

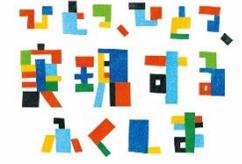
### 【IoTシステム構成】



## ② 実証実験

### 【加工機稼働監視のための無線通信IoTシステム】





# ③ 成果普及

## 【ふくしまAI・IoT技術研究会 技術トレーニング】

### ◆ 第2回技術トレーニング「首振りロボ製作で学ぶロボット制御とAI物体検出」

開催日時：令和5年8月30日（水）

講師：電子・情報科 副主任研究員 柿崎正貴

参加企業：3社4名



### ◆ 技術トレーニング特別編「3Dプリンタ入門 -IoT・AIデバイス開発への応用-」

開催日時：令和5年9月13日（水）

講師：電子・情報科 副主任研究員 柿崎正貴

参加企業：4社6名（資料提供含）



### ◆ 第3回技術トレーニング「作って・測って・動かして！IoTセンサロボットの製作」

開催日時：令和5年9月29日（金）

講師：電子・情報科 研究員 三瓶史花

参加企業：2社2名



## 【ふくしまAI・IoT技術研究会 技術セミナー】

### ◆ 令和5年度技術セミナー「製造業のためのIoT・DX活用セミナー」

令和6年2月5日（月） 13:00~16:30

ハイブリット開催（現地+オンライン）

講演①：(株)インターネットイニシアティブ

講演②：(株)ソラコム

講演③：福島県ハイテクプラザ

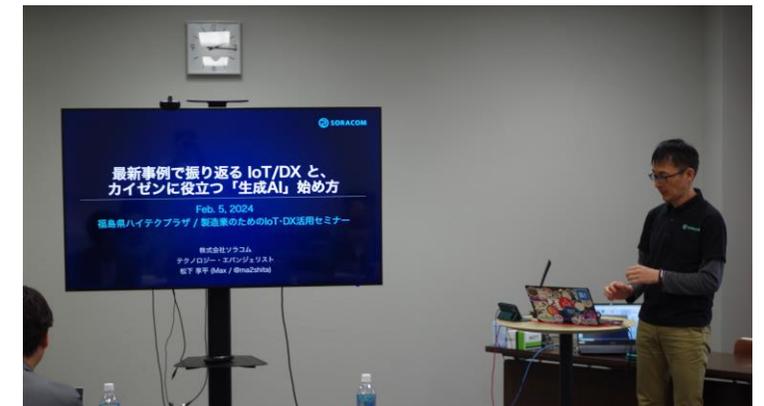
参加者： 12社18名



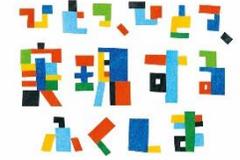
2024/3/8



令和5年度 所内研究成果発表会



29



# まとめ・今後

## 【① 性能評価】

- ◆ 【Wi-Fi HaLow】理想的な環境における通信特性評価、Wi-SUN FANとの比較
- ◆ 【Wi-SUN FAN】実環境における通信特性評価

## 【② 実証実験】

- ◆ 実証実験用IoTシステム概念設計、デバイス開発・システム構築
- ◆ ハイテクプラザ施設内においてIoTシステム機能検証

## 【③ 成果普及】

- ◆ ふくしまAI・IoT技術研究会技術セミナー・技術トレーニングを実施  
(全4回、計21社30名参加)

## 【① 性能評価】

- ◆ 【Wi-SUN FAN】 障害物のある環境における通信特性評価

## 【② 実証実験】

- ◆ 実証実験用IoTシステム機能検証(PoC)、システム最適化
- ◆ 協力企業の工場に試験導入 → システム安定性・耐障害性を評価

## 【③ 成果普及】

- ◆ ふくしまAI・IoT技術研究会を通して、成果普及&技術移転を実施