

浮上式鉄道用地上コイル 温度遠隔監視システムの開発

浮上式鉄道技術研究部 磁気浮上研究室

研究室長 田中 実



本日の発表

1. はじめに
2. 地上コイル温度監視手法
3. 地上コイル遠隔監視手法
4. まとめ
5. 成果の活用

1. はじめに（背景）

超電導磁気浮上式鉄道の技術開発は平成2年の運輸大臣通達（当時）に基づき、JR東海と共同で作成した「超電導磁気浮上式鉄道技術開発基本計画」により推進しています。

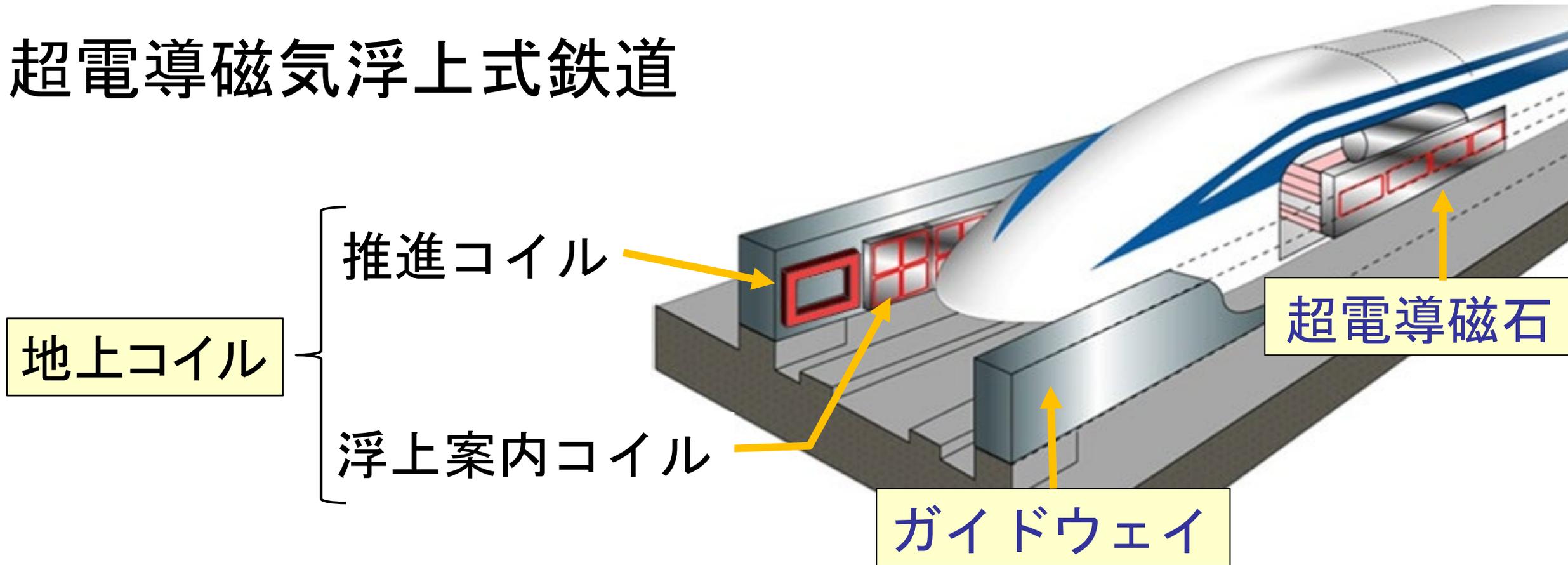
鉄道総研が取り組む開発課題

低コストかつ効率的な保守体系の検証

- ・ ICT技術等を活用した効率的な保守体系の検証

1. はじめに(浮上式鉄道)

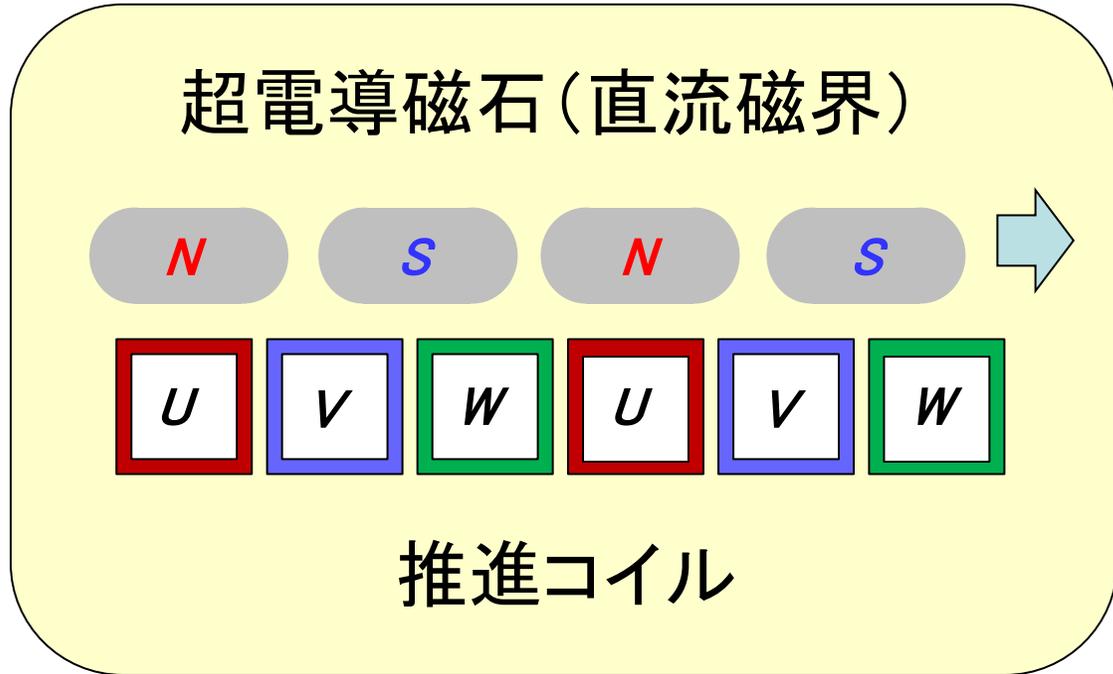
超電導磁気浮上式鉄道



- ・ 車両はガイドウェイ内を時速500kmで走行
- ・ 超電導磁石の強力な磁場を利用して浮上

1. はじめに(推進・浮上・案内のしくみ)

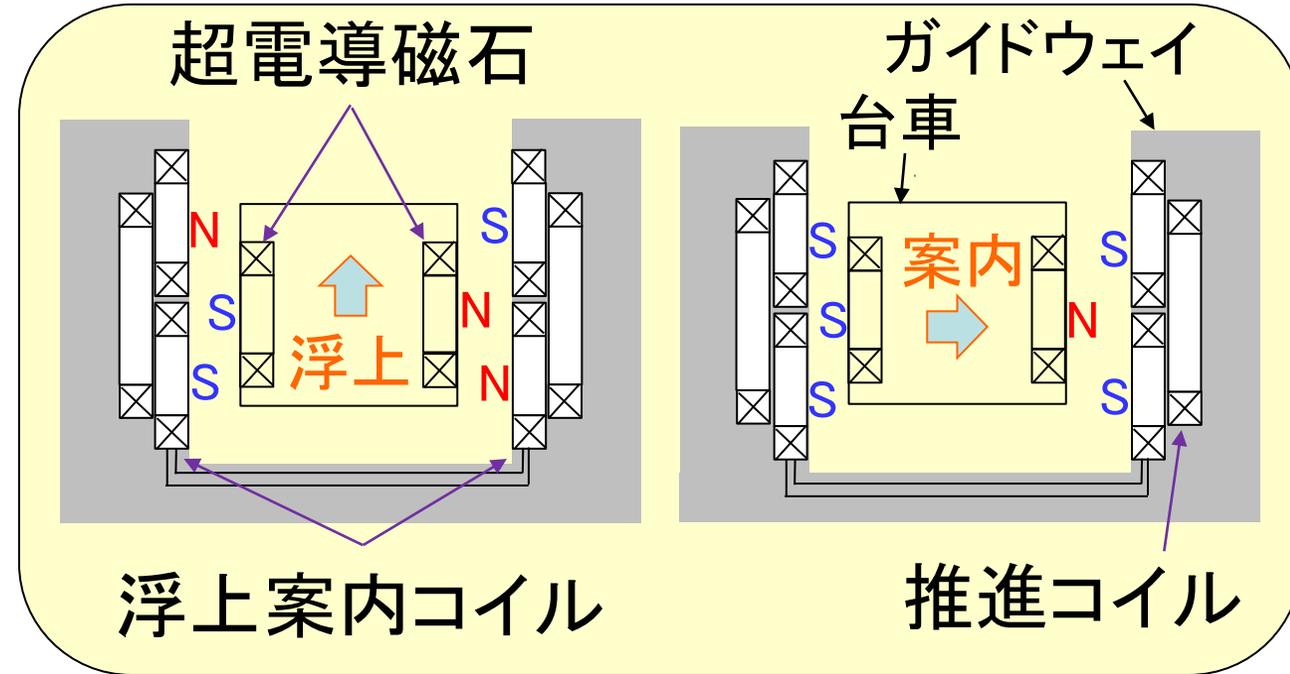
推進のしくみ



リニア同期モータ

- ・ 走行パターンに基づき三相交流を外部より通電

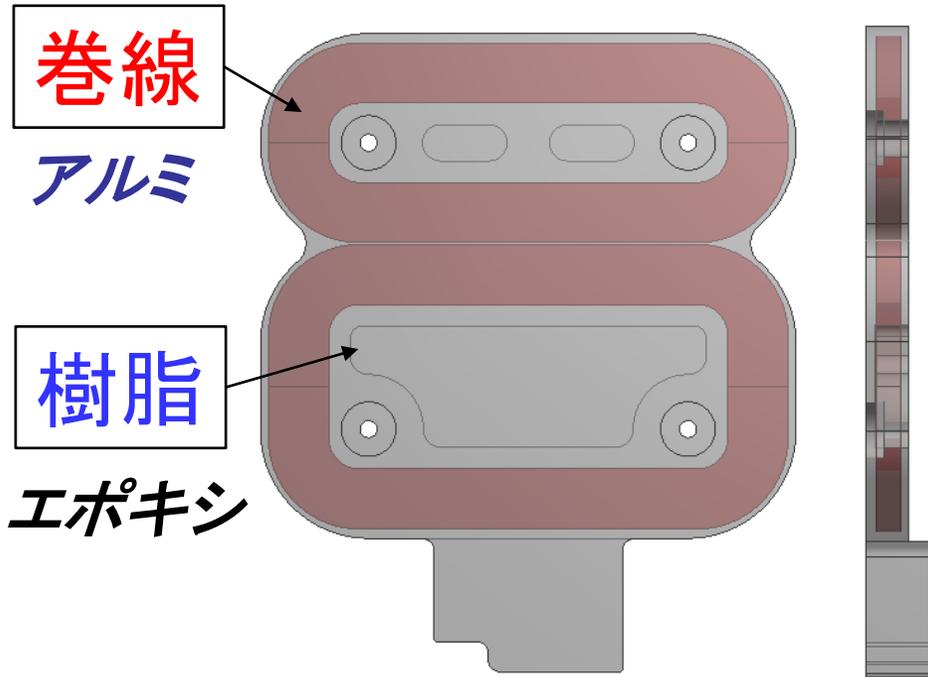
浮上・案内のしくみ



側壁浮上方式

- ・ 台車が中央位置からずれると、浮上案内コイルに電流が誘導され、浮上力や案内力が発生

1. はじめに(温度管理の必要性)



推進・浮上・案内兼用地上コイル
(PLGコイル)

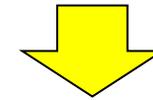
巻線：電磁力、高電圧

樹脂：機械強度、絶縁強度

影響

状態監視：温度/振動/ひずみ/部分放電

長期運用には樹脂の温度管理が重要



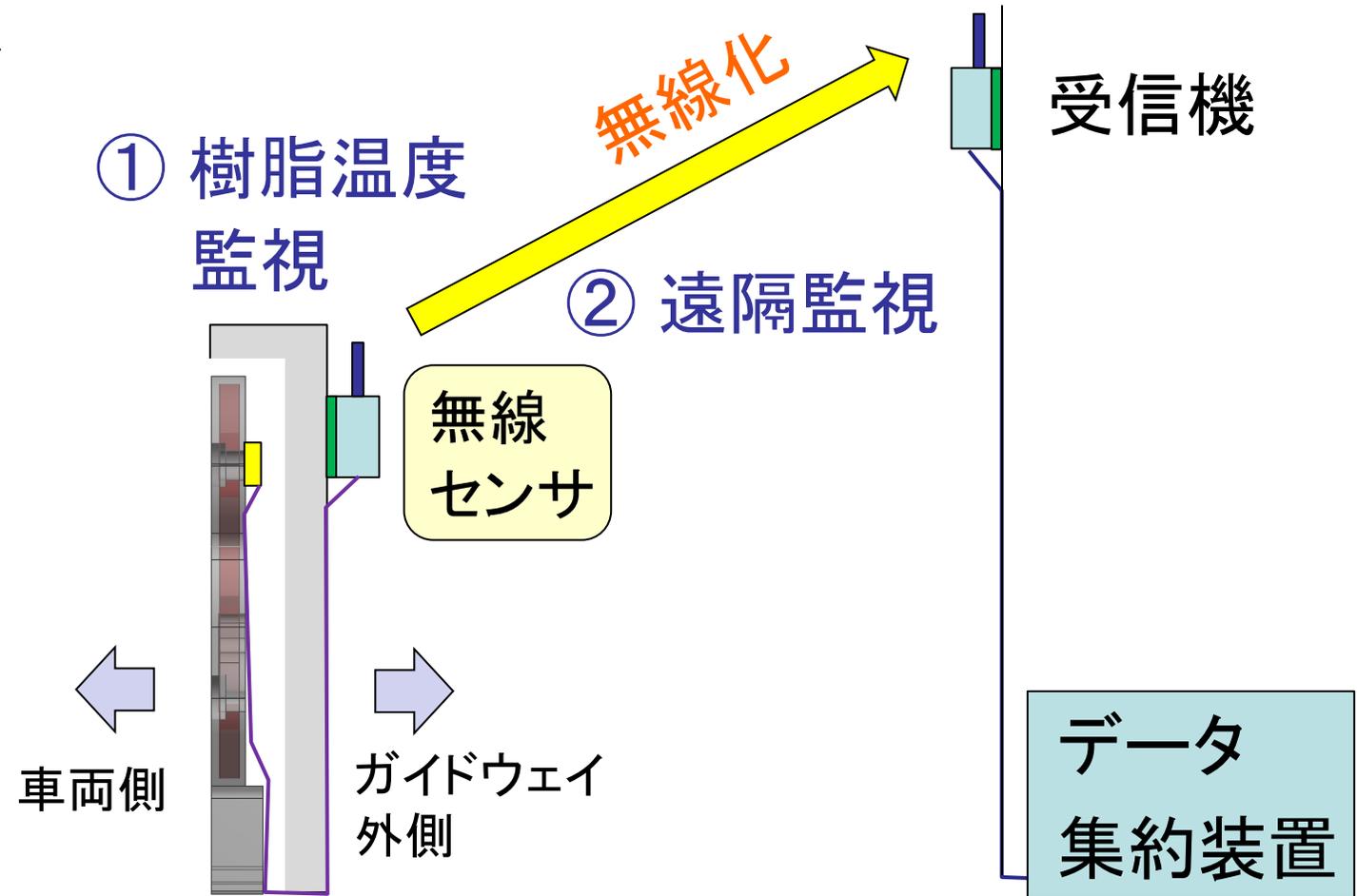
温度遠隔監視システムの開発

1. はじめに(温度遠隔監視システム)

温度遠隔監視システム

検討事項

- ① 樹脂温度監視手法
 - 樹脂内部温度推定
- ② 遠隔監視手法
 - 無線選定／通信試験
 - 複数無線センサ利用
 - データ到達率向上
 - 無線センサの省電力化
 - セキュリティ対策



温度遠隔監視システムの構成

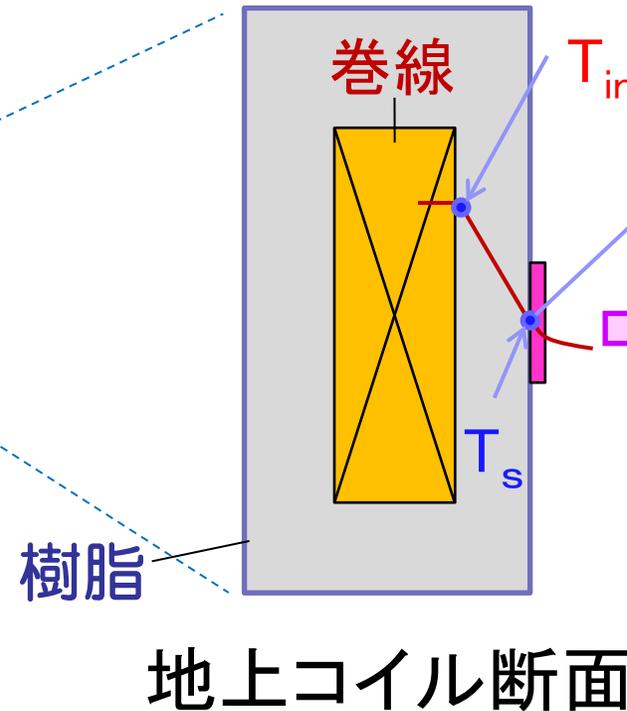
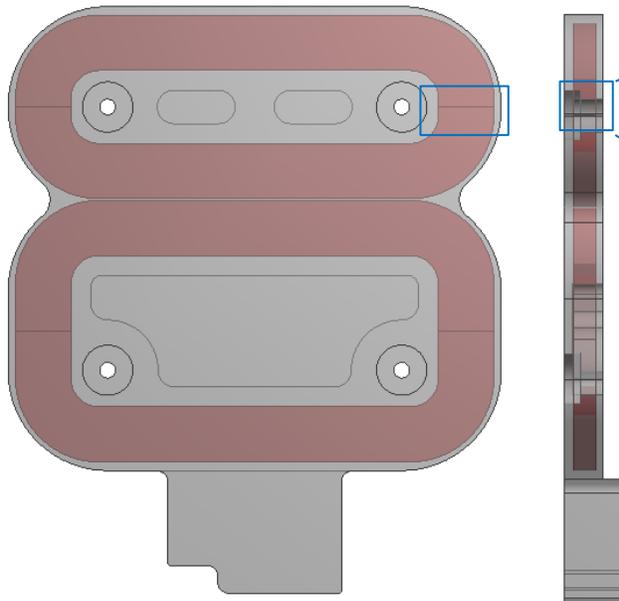
2. 地上コイル温度監視手法（樹脂内部温度推定）

樹脂温度監視

通電により巻線近傍の樹脂内部が表面よりも高温となる。

⇒ センサの埋め込みは困難

⇒ 表面に設置した熱流センサから内部温度を推定する手法を検討



樹脂の内部温度 T_{in}

$$\doteq \text{表面温度 } T_s + \text{熱流束 } q \times \text{熱抵抗}$$

熱の移動量 熱の伝わりにくさ

熱電対

熱流センサ

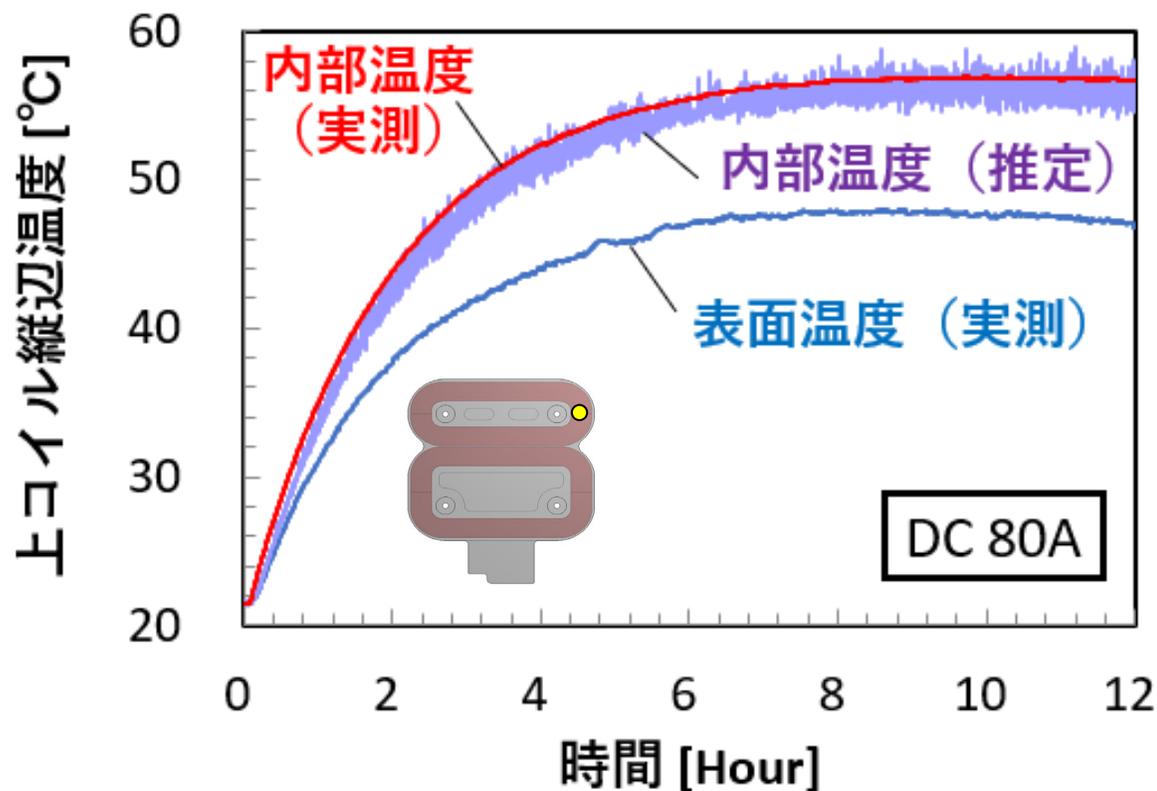
＜熱流束＞
単位時間・単位面積あたりの熱の移動量



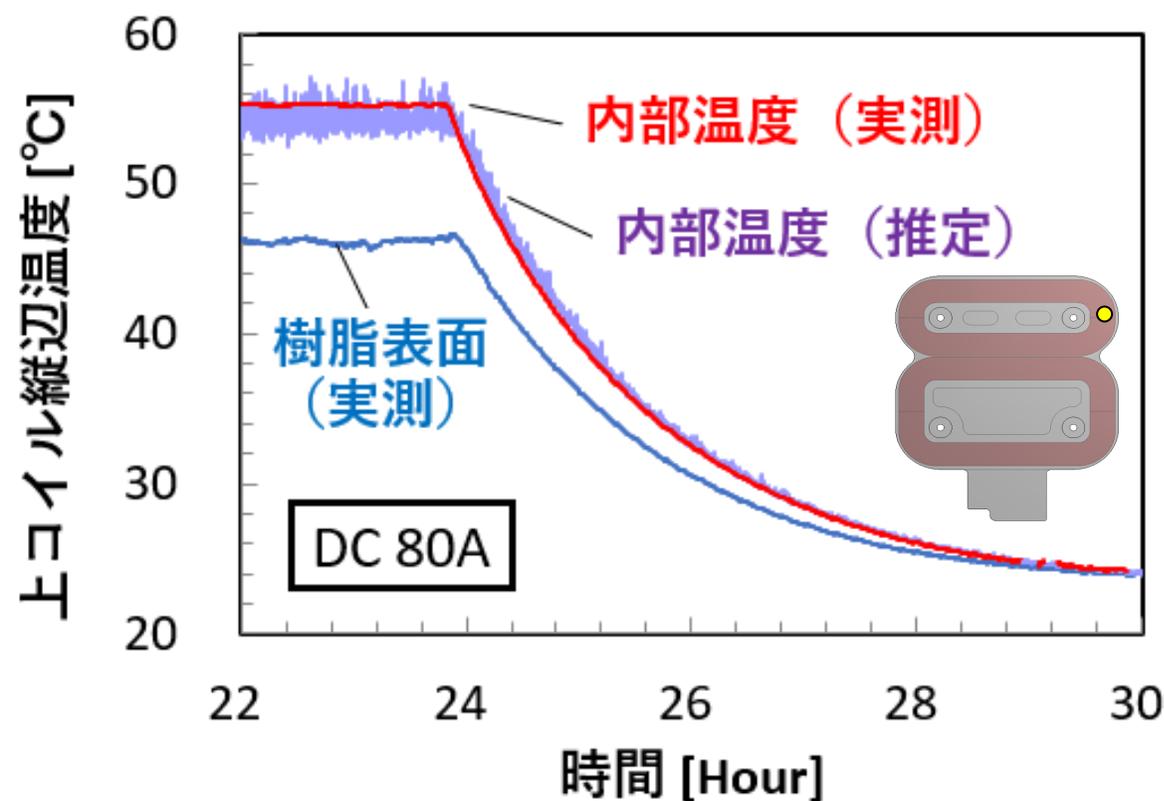
熱流センサ

2. 地上コイル温度監視手法（樹脂内部温度推定）

樹脂温度推定結果（ベンチテスト）



(a) 温度上昇時



(b) 冷却時

従来は樹脂表面温度の監視のみ



熱流センサにより樹脂内部温度を推定可能

3. 地上コイル遠隔監視手法（無線選定）

遠隔監視条件

- トンネル内の1km程度の遠隔監視
- バッテリーによる長期駆動
- データ量は少なくて良い。
- 通信費不要 / 免許不要

低消費電力長距離無線

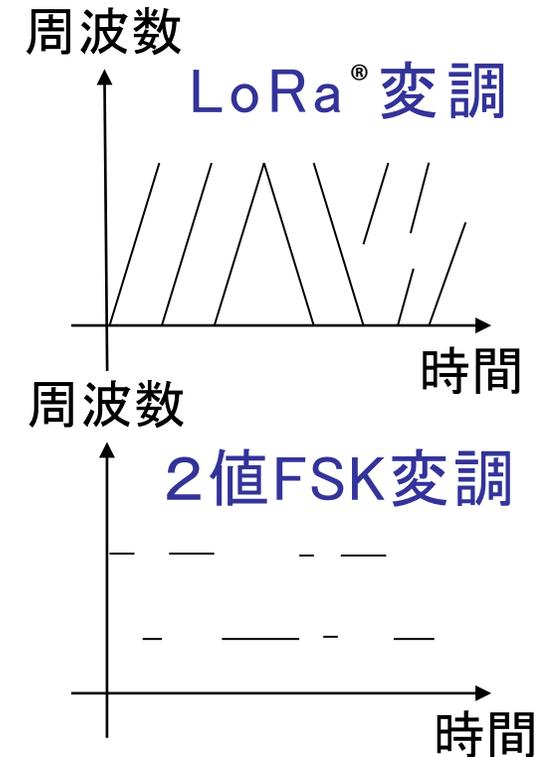
(LPWA : Low Power Wide Area)



LoRa[®] (Long Range)を選定

表 LoRa[®]無線仕様 (株)サーキットデザイン製SLR-429M

項目	仕様		備考
規格	ARIB STD-T67		特定小電力無線局
周波数	429.25~429.7375MHz		40ch(間隔12.5kHz)
送信電力	10mW以下		免許不要
変調方式	LoRa [®]	FSK	選択可能
通信速度	245bps (拡散率7)	4800bps	選択可能
受信感度	-133dBm (拡散率7)	-115dBm	選択可能



3. 地上コイル遠隔監視手法（通信試験）

宮崎実験線指令室



高さ
約16.6m

拡散率7
5バイト



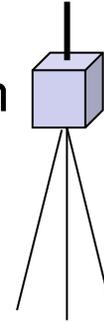
高さ
約1.6m

ガイドウェイ

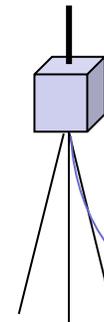


課題:トンネル内ではアンテナを高くできない。

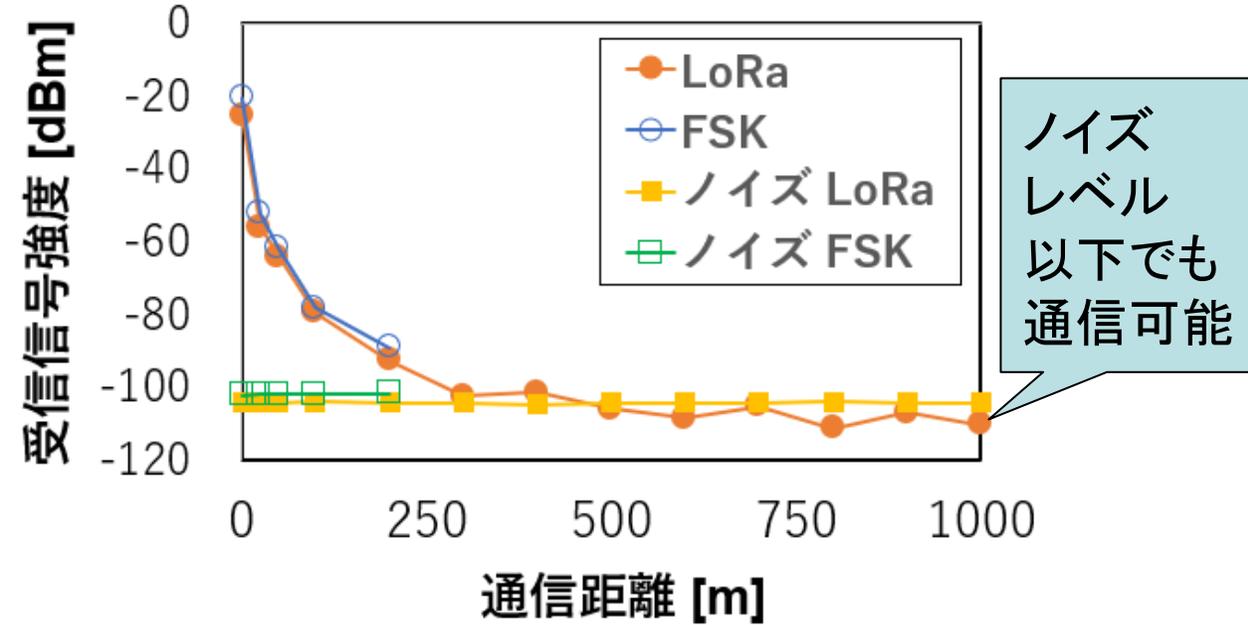
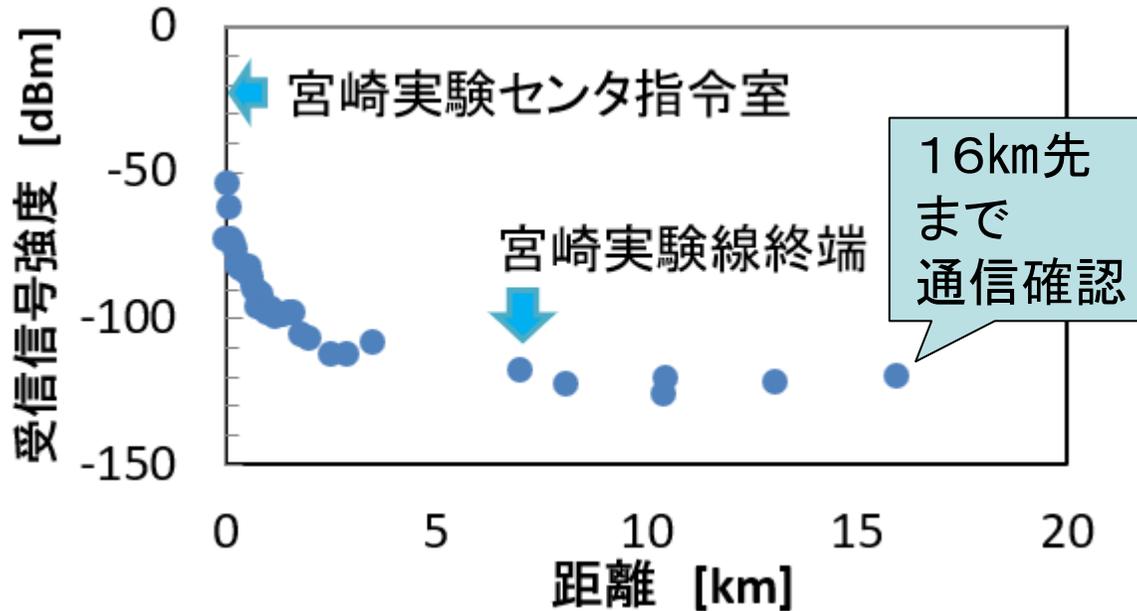
高さ1m



通信試験は
データ量5バイト
拡散率7で実施

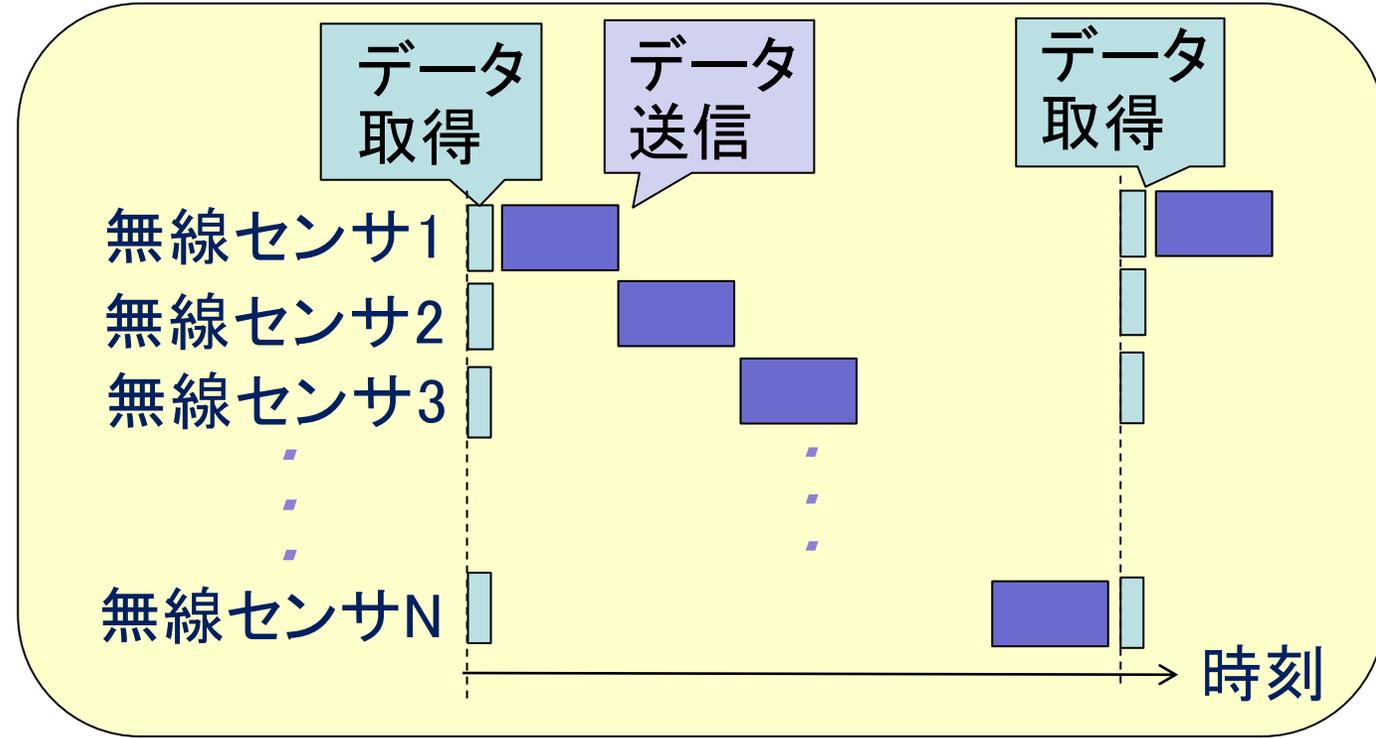
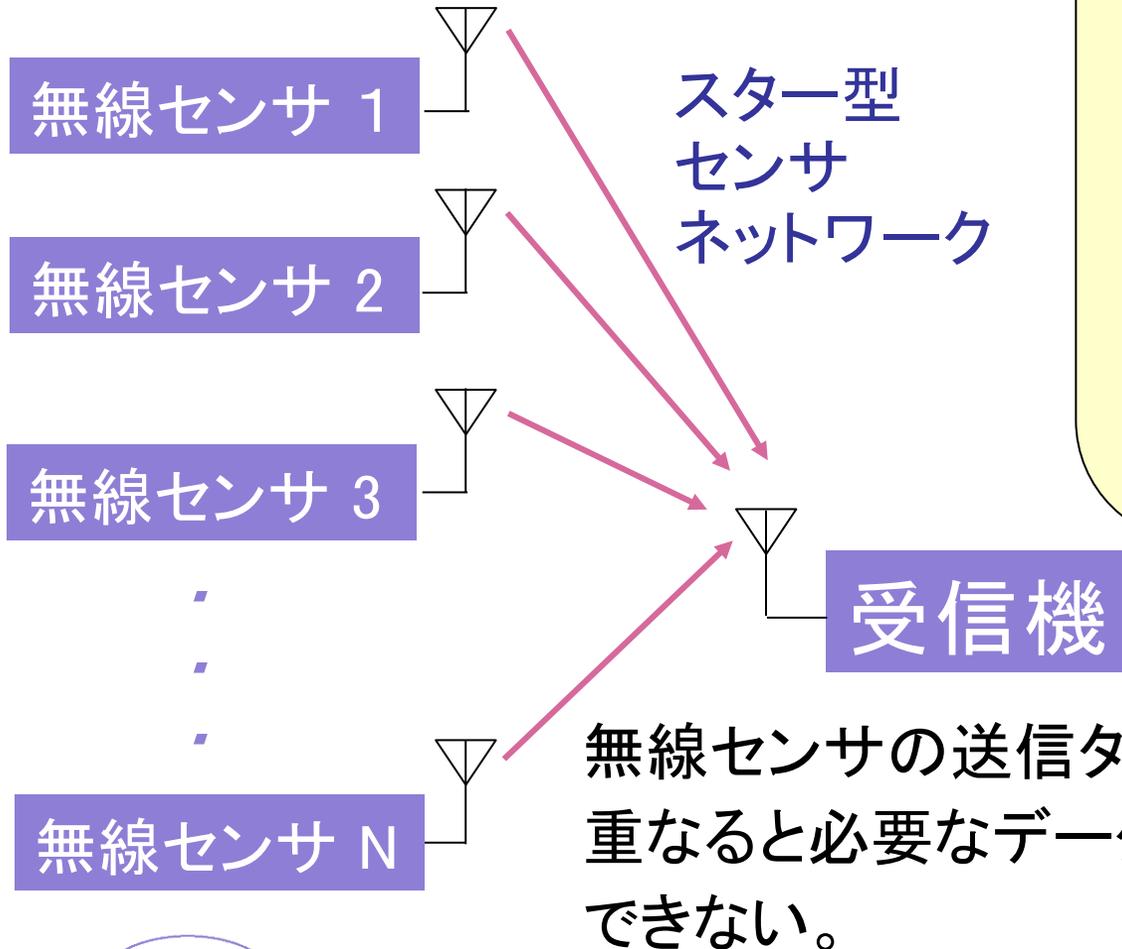


高さ1m



3. 地上コイル遠隔監視手法(複数無線センサ利用)

複数無線センサの利用方法



送信時間割り当て方法

⇒ 送信時間が重ならないように無線センサ毎に送信時間を割り当て。

3. 地上コイル遠隔監視手法(到達率向上)

遠隔監視(無線化)の課題

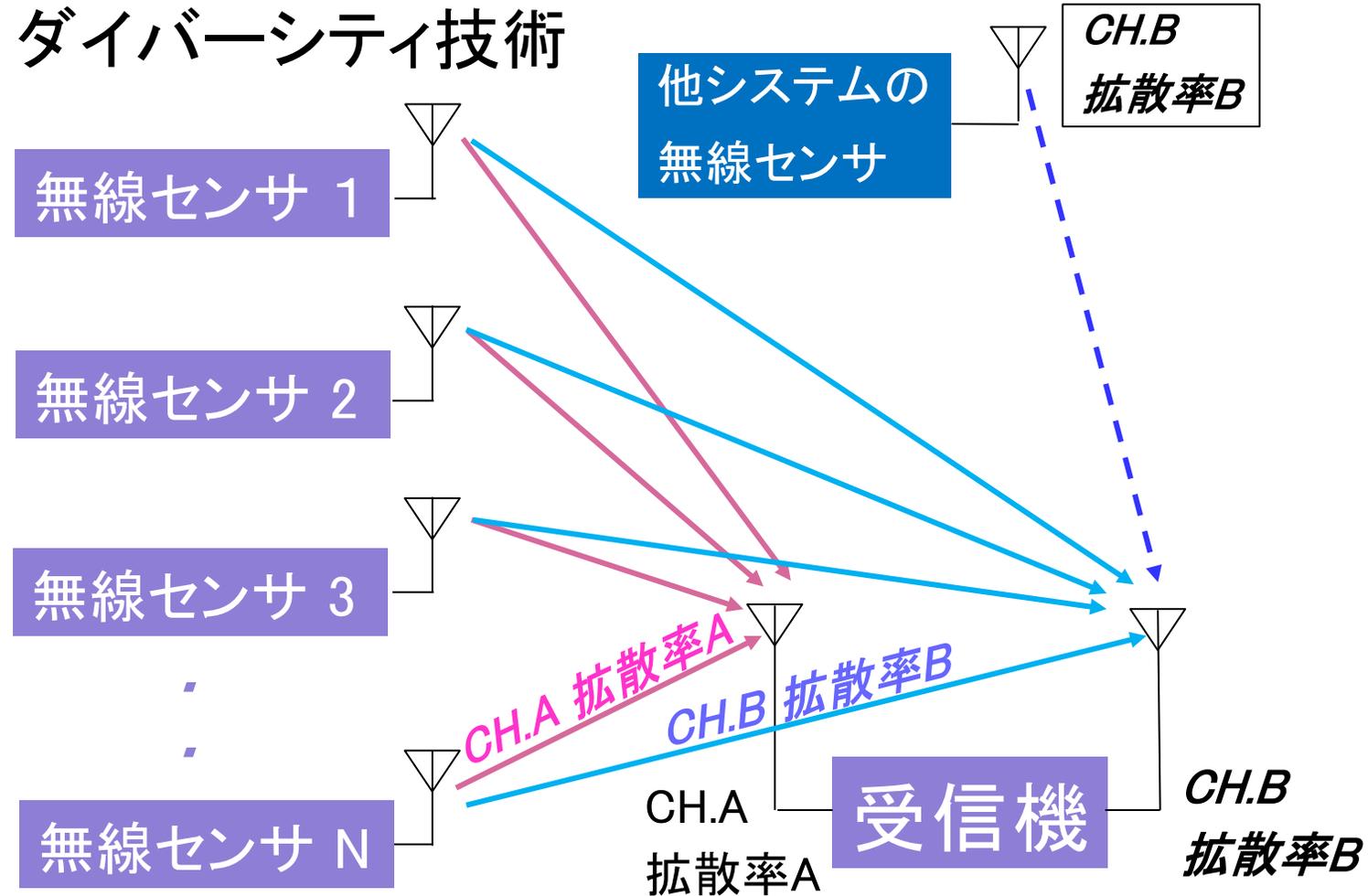
無線のデータ到達率は100%にはならない。

同一通信条件の他の無線と電波干渉する懸念がある。

複数通信経路の長さの違いにより、受信点で位相がずれて、強度が変動するフェージングの懸念がある。

➡ 無線センサは同一データを異なる通信条件で2回送信。受信機は2本のアンテナで異なる条件のデータを受信。

ダイバーシティ技術

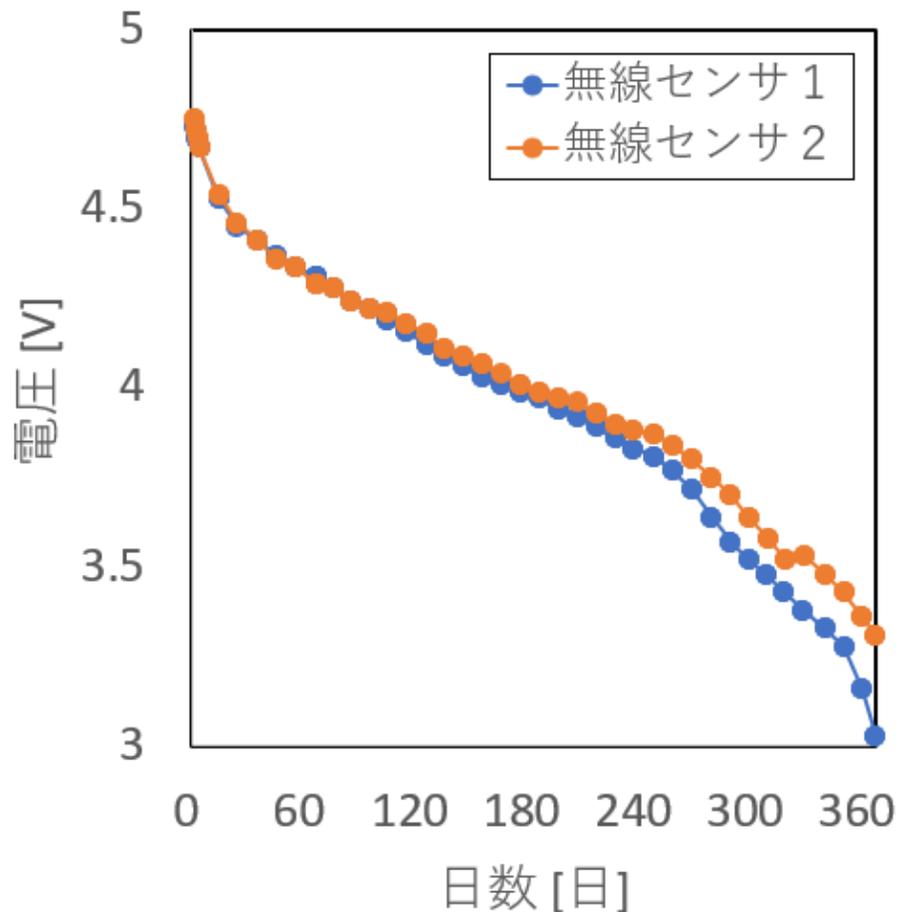


32日間連続通信試験でダイバーシティ技術の効果を確認

(鉄道総研報告Vol.34, No.11, pp. 31-36参照)

3. 地上コイル遠隔監視手法(省電力化)

課題: 定期的な電池交換必要 対策: 間欠動作 / 超電導磁石発電装置開発

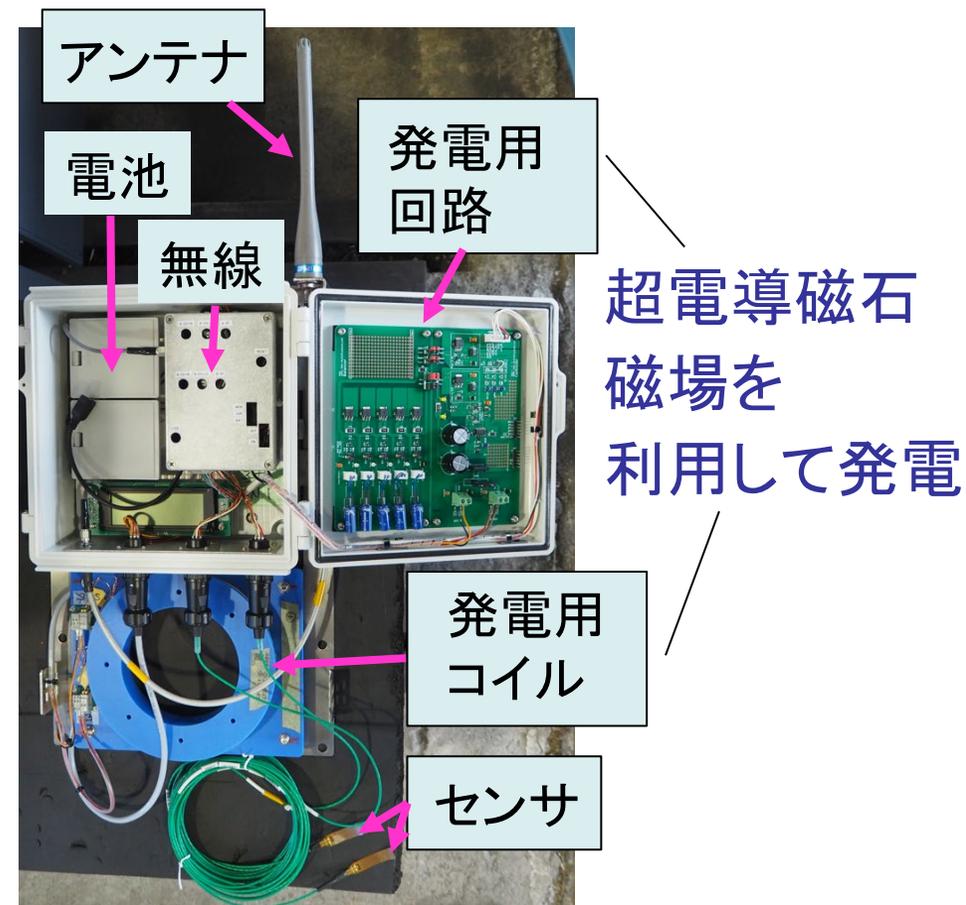


1日18時間
5分間隔で
データ取得/送信

間欠動作

単三電池6本で
(3直列×2並列)
1年間の動作を
確認

2台の無線センサの電池電圧

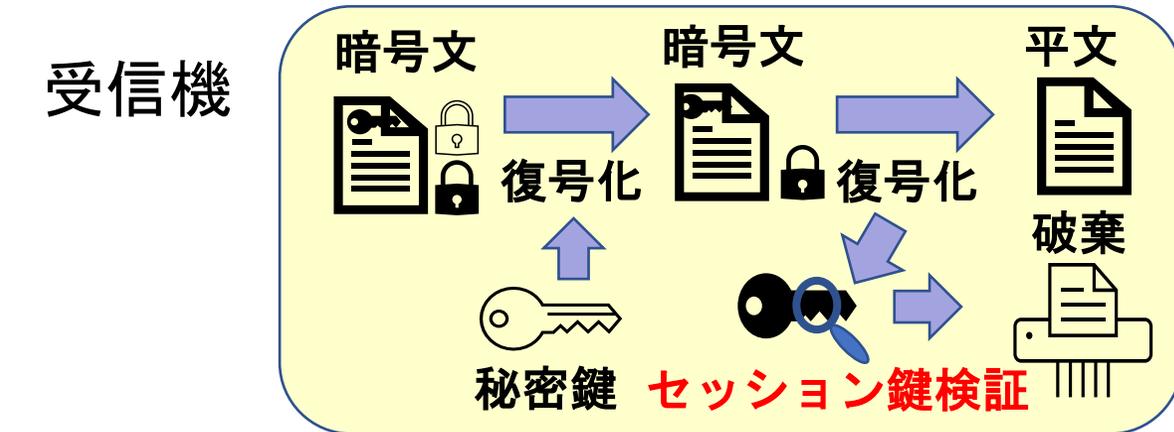
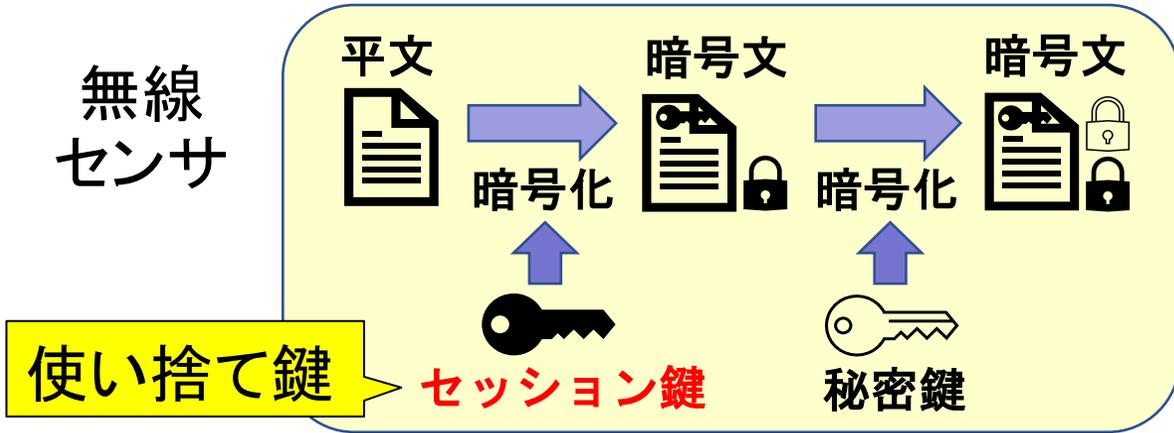
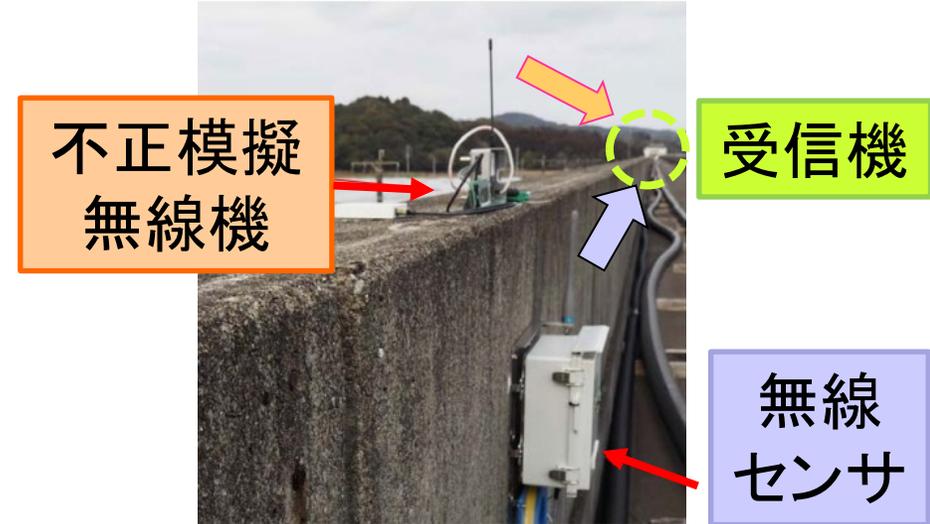


発電機能付き無線センサ

3. 地上コイル遠隔監視手法(セキュリティ)

課題：地上の通信ではセキュリティ対策が必要

対策：無線センサに実装可能な処理の軽い暗号を導入



共通鍵暗号方式

不正データ破棄機能の確認

受信時刻	無線センサ	温度	熱流束
14:30:46	不正データ ⇒ 破棄		
14:30:58	不正データ ⇒ 破棄		
14:31:07	正規データ	11.8°C	20W/m ²
14:31:12	正規データ	11.8°C	20W/m ²
14:31:17	不正データ ⇒ 破棄		



4. まとめ

課題

- ① 樹脂温度監視手法
- ② 遠隔監視手法
 - 無線選定／通信試験
 - 複数無線センサ利用
 - データ到達率向上
 - 無線センサの省電力化
 - セキュリティ対策

成果

- ➡ 熱流センサを用いて樹脂の内部温度を推定
- ➡ 電池駆動で長距離通信が可能な LoRa[®]を選定
- ➡ 無線センサ毎に送信時間を割り当てて干渉を回避
- ➡ ダイバーシティ技術を利用して到達率向上
- ➡ 間欠動作で1年駆動、超電導磁石利用発電装置開発
- ➡ 送信データの暗号化と不正データの破棄を実現

5. 成果の活用

- 温度監視に成果を活用すると、表面に設置したセンサで内部温度を推定することが可能となります。
- 遠隔監視システムに成果を活用すると、複数無線センサによる監視、データ到達率向上、省電力化、セキュリティ対策が可能となります。

参考文献

田中実、池田遼平、高橋紀之：「低消費電力の
長距離無線技術を用いた地上設備状態監視シス
テムの構築」,鉄道総研報告、Vol.34、No.11、
pp. 31-36、2020