

車載ハーネスの軽量化を実現する 有線/無線連携通信技術の研究開発

総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE)

電波有効利用促進型研究開発

先進的電波有効利用型 (社会展開促進型)

2021年度～2022年度, 受付番号 JP215007006

共同研究: デンソーテン, ATR

○太田能, 右田創, 竹中誠, FINNERTY Patrick (神戸大)

奥原誠, 栗岡伸行 (デンソーテン)

清水聡, 臼井誠 (ATR)

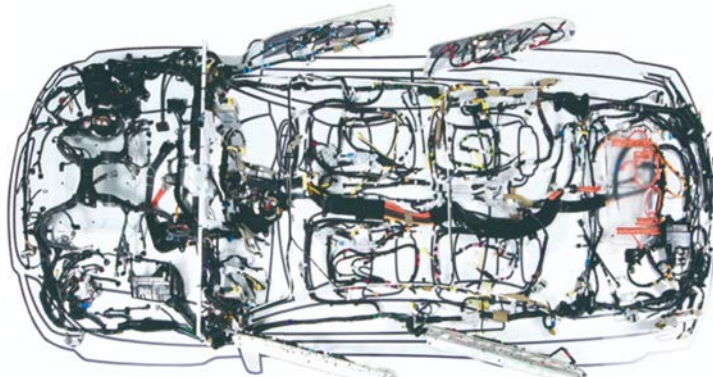
背景/目的（研究全体）

背景：カーボンニュートラル → 自動車燃費改善

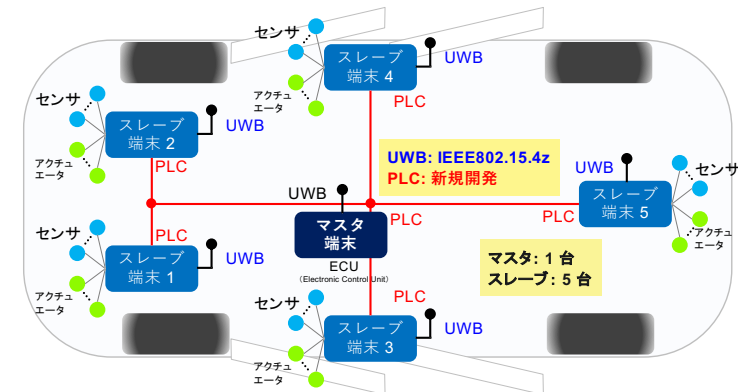
目的：UWB[†]/PLC[‡] 統合利用によりハーネス削減 → 車重軽量化

[†] Ultra Wideband: マルチパス耐性, 屋外利用可, 車載応用 (スマートキー)

[‡] Power Line Communication: 車載環境 (非平衡線路) → 新規開発



矢崎総業 (株) <https://www.yazaki-group.com/wireharness/>



- ハーネス：軽 10 kg, 普 20 kg, 大型 40 kg 以上
- 1 kg あたりガソリン車 10 m/L, EV 4 m/kwh 改善
→ CO₂ 0.15 g/km 削減可能

- 100 万トン級の CO₂ 削減と省エネ実現
- 製造時の配線ミス・配線工数の削減
- 販売後の断線トラブルの解消
- 廃車時の分別容易

UWB/PLC 統合利用技術の確立

課題工 (全機関)

統合実装と システムレベル 評価

システム概要

- ・車載環境下での UWB 通信特性
- ・無線パラメータ特性

課題イ (デンソーテン)

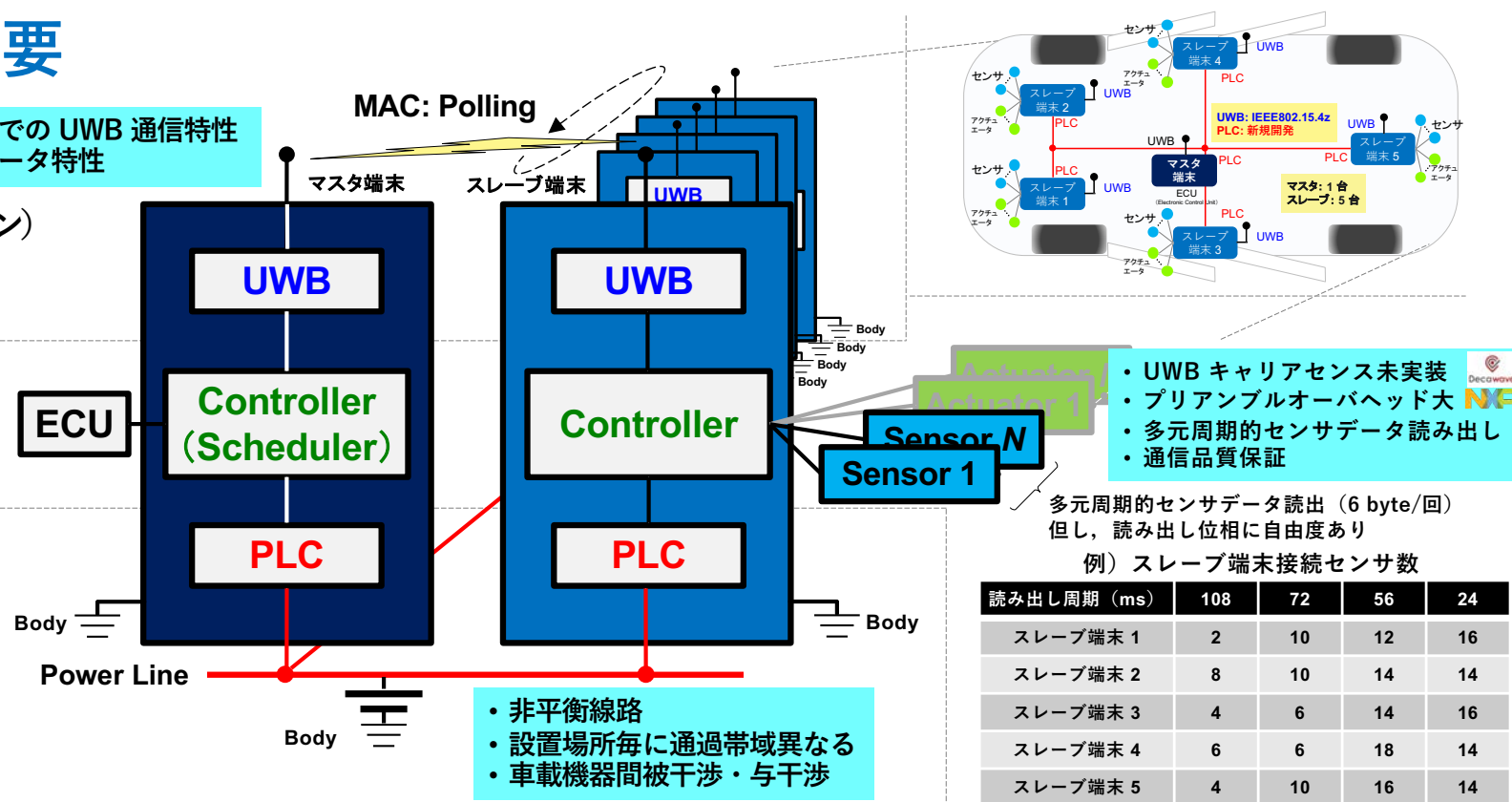
UWB 干渉評価・ 対策技術開発

課題ア (神戸大)

スケジューリング アルゴリズム開発

課題ウ (ATR)

車載電源ライン 向けPLC開発



目標通信品質

† **セーフティ系**：ブレーキ、アクセルなど、‡ **ボディ系**：ドア、ワイパー、ウインドウなど

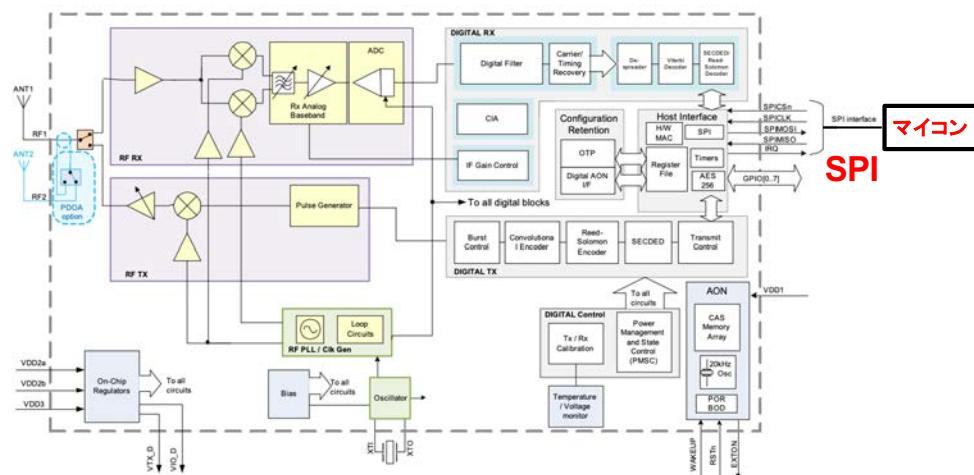
* PLC 通信容量：Controller Area Network（CAN）伝送速度 1 Mbit/s のおよそ半分

最終目標

通信方式	データ種別	想定負荷	許容遅延	許容データ損失率
PLC*（有線）	セーフティ系†	250 kbit/s	≦ 15 ms	≦ 10 ⁻⁴
	ボディ系‡	250 kbit/s	≦ 25 ms	≦ 10 ⁻³
UWB（無線）	ボディ系‡	250 kbit/s	≦ 25 ms	≦ 10 ⁻³

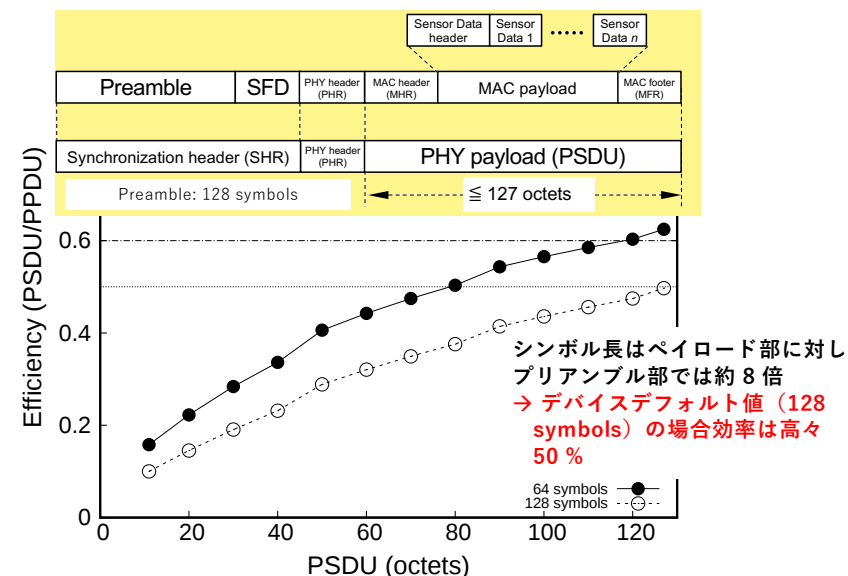
課題ア：開発実装におけるポイント

- キャリアセンスはオプション (IEEE802.15.4a/z) , 市販品未実装
→ 基地局主導型メディアアクセス制御
- SPI (Serial Peripheral Interface) 通信オーバヘッド大, 受信バッファ小
- プリアンブルオーバヘッド大
→ 送受信パケット数はできるだけ減らしたい
→ センサデータはまとめて (集約して) 一回で読み出したい



Qorvo DW3000 IC Block Diagram

[7] Decawave Datasheet
https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2021/03/DW3000_Datasheet.pdf

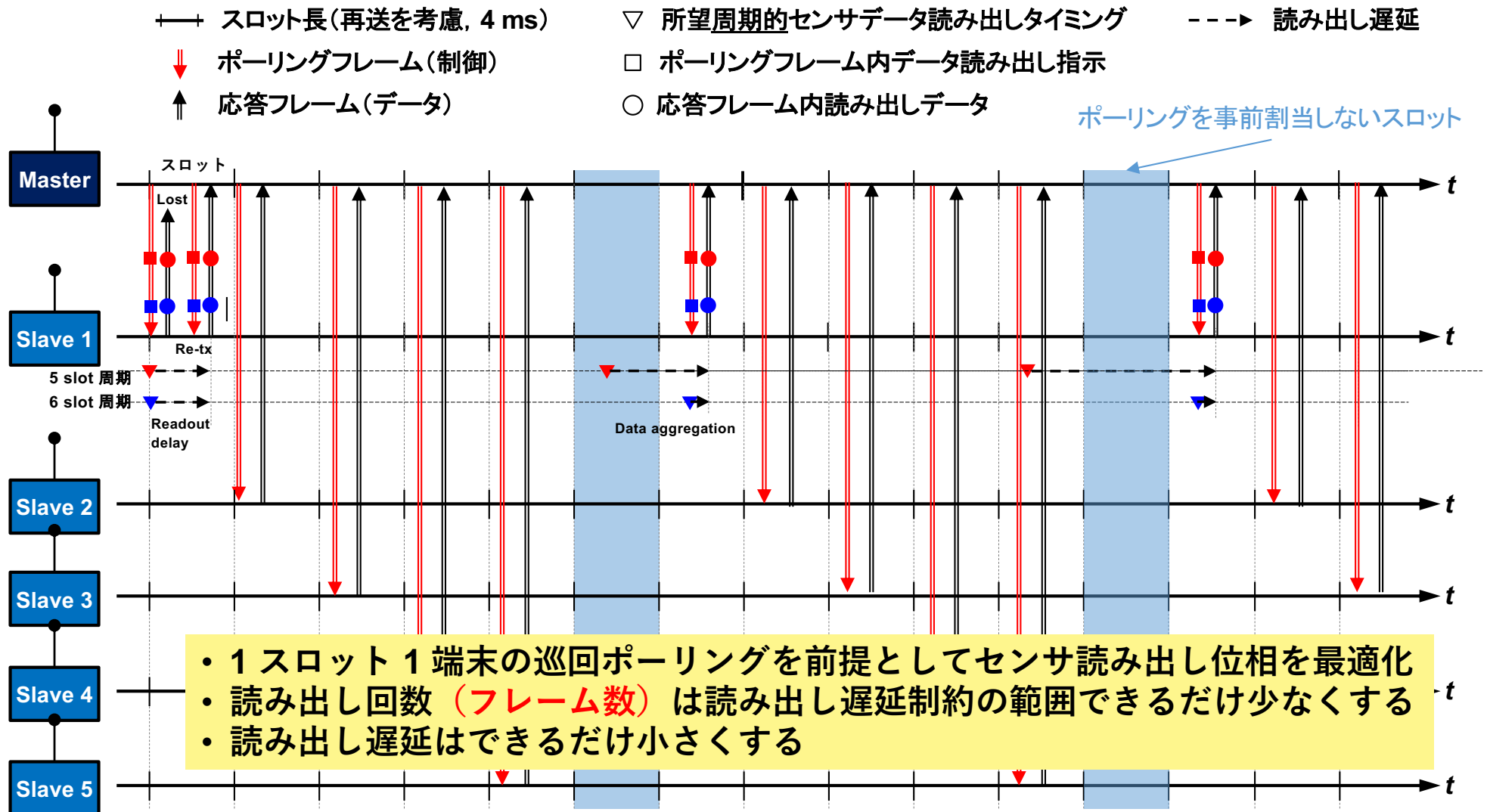


[8] M. Charlier et al., "Support for IEEE 802.15.4 Ultra Wideband Communications in the Contiki Operating System," Proc. 2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies, 2016.

データ読み出し周期性を考慮したデータ集約ポーリングスケジューリング

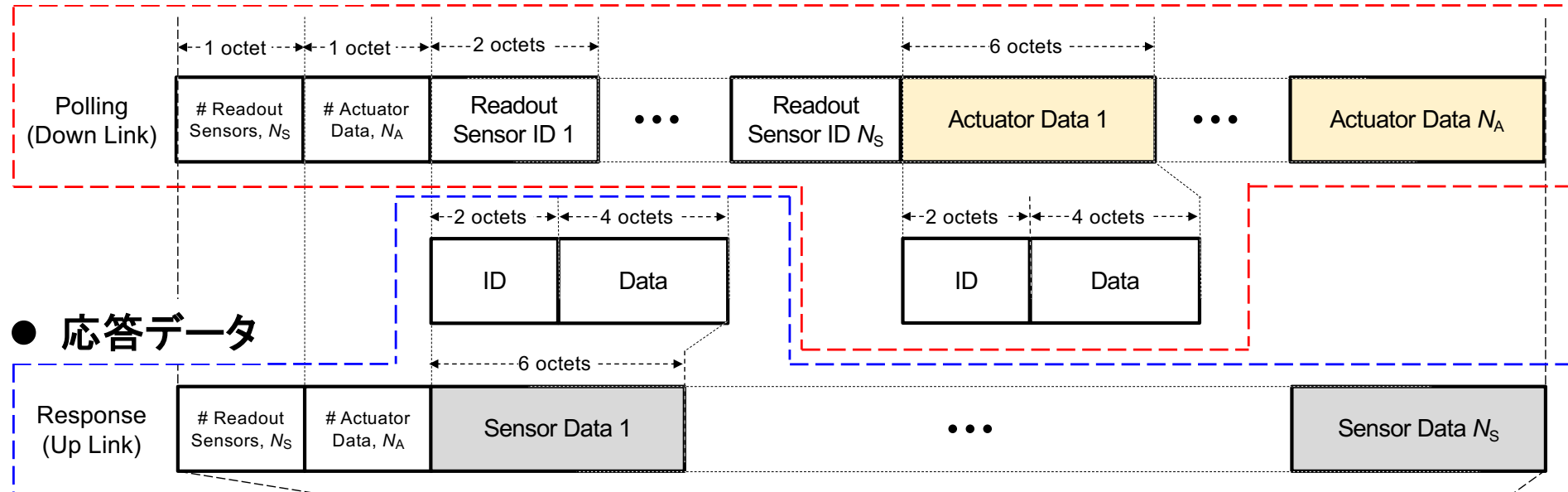
課題ア：ポーリングスケジューリング概要

● 親機（マスタ）が子機（スレーブ）の通信を制御



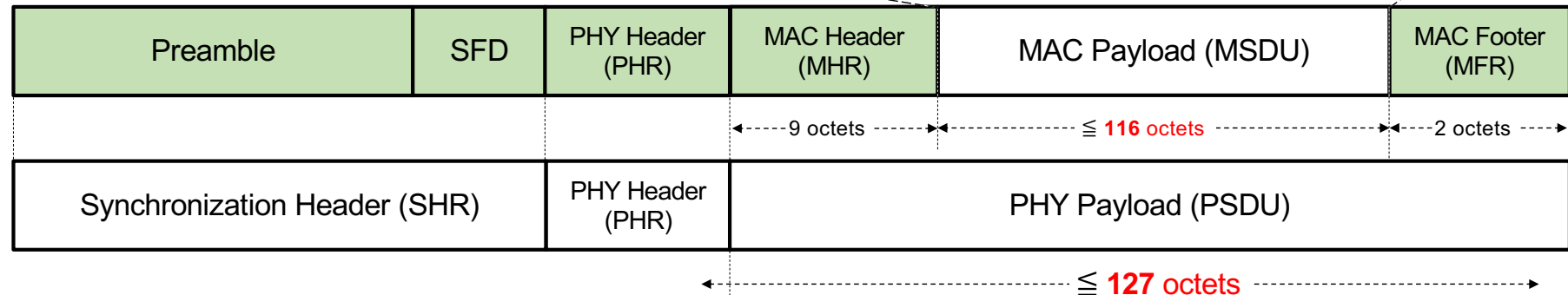
課題ア：フレームフォーマット

● ポーリングデータ



● 応答データ

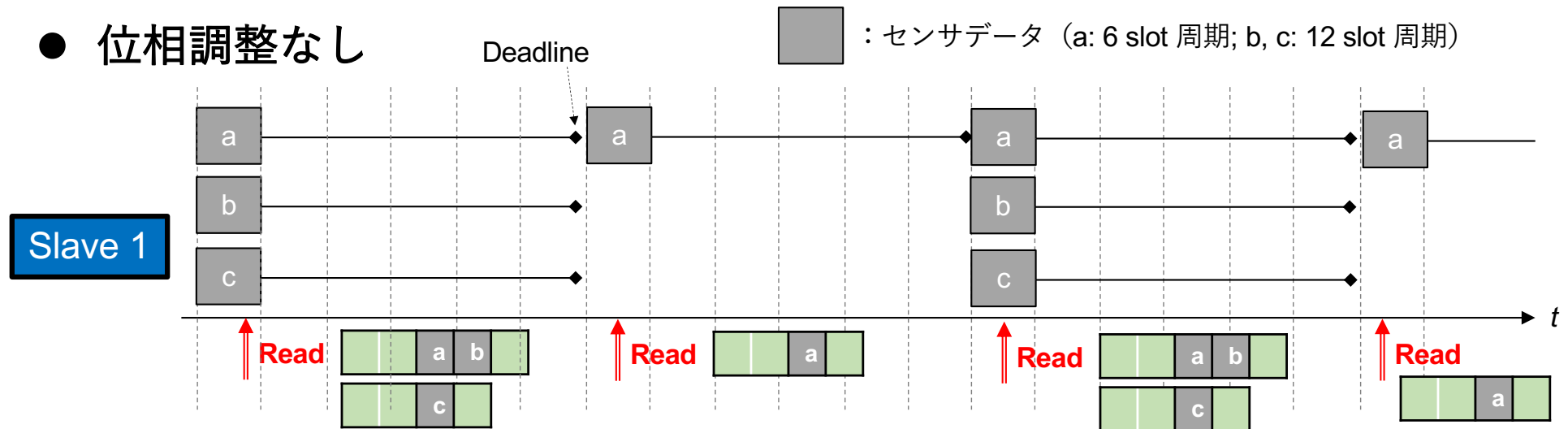
● MACフレーム



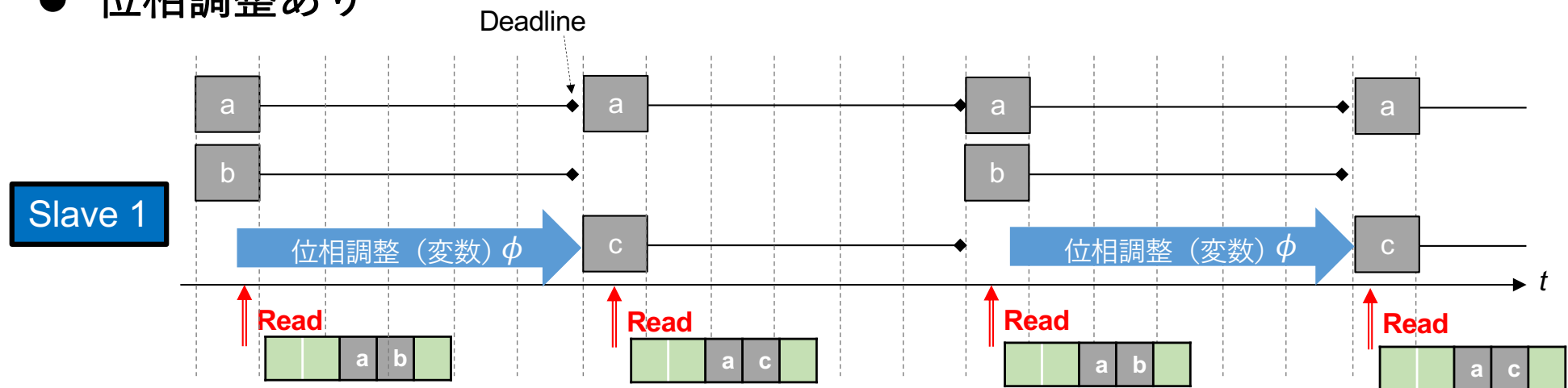
- 読み出し指示センサ数は1ポーリングで最大 57
 - 1フレームで送信可能センサ数は最大 19 データ
- } → 1 ポーリングでセンサデータ上りフレームは最大 3

課題ア：読み出し位相シフトの基本アイデア

● 位相調整なし



● 位相調整あり



センサ読み出し位相の最適化により応答フレーム数を削減

課題ア：スケジューリング問題定式化

上り通信のみ

Minimize

重み係数 α

$$\alpha \sum_{k=0}^{S+T/c} p_k + (1 - \alpha) \sum_{j \in \mathcal{J}} \{s_j \delta - a_j\},$$

総パケット数 総読み出し遅延

Subject to

- $s_j \delta - a_j \leq D - \delta, \forall j \in \mathcal{J},$
- $a_j + \varphi_{id} \delta - s_j \delta \leq 0, \forall j \in \mathcal{J},$
- $\sum_{k=0}^{S+T/c} x_{j,k} = 1, \forall j \in \mathcal{J},$
- $\sum_{j \in \mathcal{J}} x_{j,k} \leq M, \left(0 \leq k < S + \frac{T}{c}\right)$

- 0 = 読み出しデータ数のとき
パケット数 $p_k = 0$
- $0 < \text{読み出しデータ数} \leq 19$ のとき
パケット数 $p_k = 1$
- $19 < \text{読み出しデータ数} \leq 38$ のとき
パケット数 $p_k = 2$

SOS2 (Special Ordered Set Type 2)
変数導入による非線形制約の線形化

- $p_k = t_{1,k} + t_{2,k} + 2t_{3,k} + 2t_{4,k}$
- $\sum_{j \in \mathcal{J}} x_{j,k} = t_{1,k} + 19t_{2,k} + 20t_{3,k} + 38t_{4,k}$
- $t_{0,k} + t_{1,k} + t_{2,k} + t_{3,k} + t_{4,k} = 1$
- $z_{0,k} + z_{1,k} + z_{2,k} + z_{3,k} = 1$
- $t_{0,k} \leq z_{0,k},$
- $t_{1,k} \leq z_{0,k} + z_{1,k},$
- $t_{2,k} \leq z_{1,k} + z_{2,k},$
- $t_{3,k} \leq z_{2,k} + z_{3,k},$
- $t_{4,k} \leq z_{3,k}$

- T : スケジュール周期 (読み出し周期最小公倍数)
- δ : スロット時間幅 (ms)
- S : スケジュール周期 (T) 内総スロット数
- D : センサデータ読み出し許容遅延
- c : 最小読み出し周期 (ms)
- M : 1スロット内読み出し可能データサイズ
- k : ポーリングスロットインデックス ($0 \leq k < S + T/c$)
- $\mathcal{N}$: スレーブ端末集合
- J_n : スレーブ端末 n に対する読み出しデータ集合
- a_j : センサデータ j 所望読み出し時刻 (ms)
- s_j : センサデータ j 読み出し割当スロット番号
- $x_{j,k}$: 二値変数
(k 番目ポーリングスロットにデータ読み出しがある場合1)
- φ_{id} : 整数変数(シフトするスロットの数を示す)
- p_k : 整数変数(k 番目ポーリングスロットにおけるパケット数)

SOS2変数群導入により整数計画問題として定式化

課題ア：スケジューリング生成例

赤の数字：所望データ読み出し数

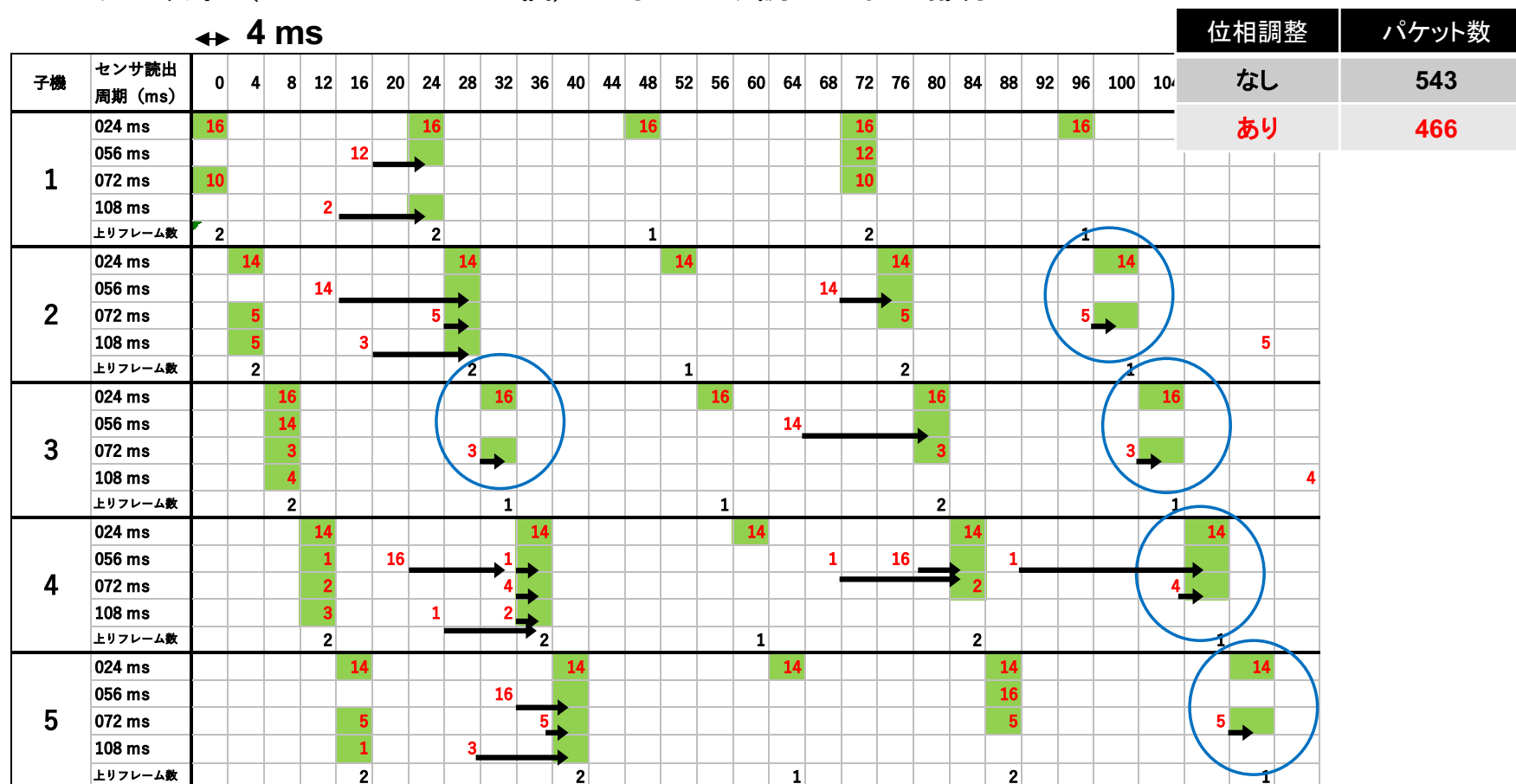
■：通信権付与され、データ送信をするスロット

→：所望読み出し時刻から送信までの遅延

○：1パケット以下（センサデータ 19 個）となるよう調整された部分

スレーブ端末接続センサ数（負荷 250 kbit/s）

読み出し周期（ms）	108	72	56	24
スレーブ端末 1	2	10	12	16
スレーブ端末 2	8	10	14	14
スレーブ端末 3	4	6	14	16
スレーブ端末 4	6	6	18	14
スレーブ端末 5	4	10	16	14

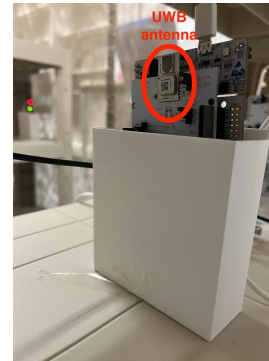


データ読み出しタイミング調整により送信フレーム数削減

課題ア：簡易評価実験



メディカル・エイド株式会社製 EMCテント

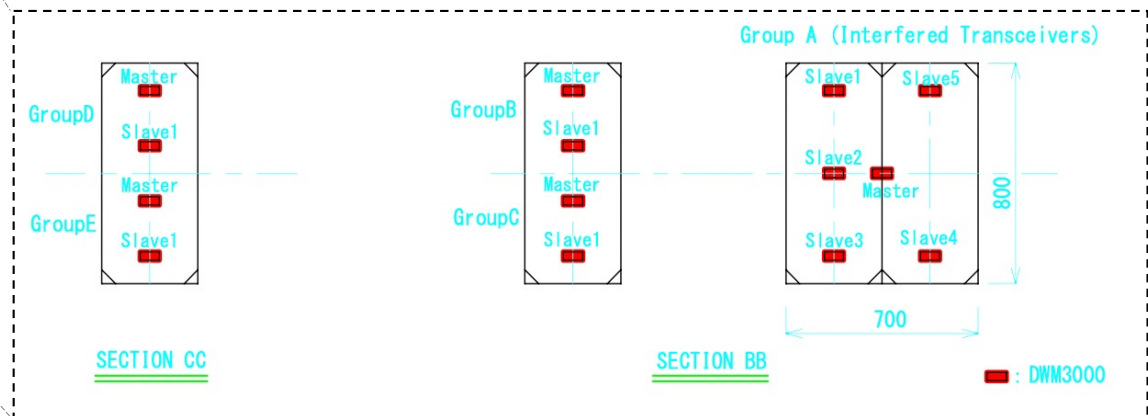


UWB 端末 (Qorvo DWM3000)

- チャンネル 9 (中心周波数 7987.2 MHz, 帯域幅 499.2 MHz)
- データレート 6.81 Mbit/s
- プリアンブル長 64 symbol

スレーブ端末接続センサ数 (高負荷 250 kbit/s)

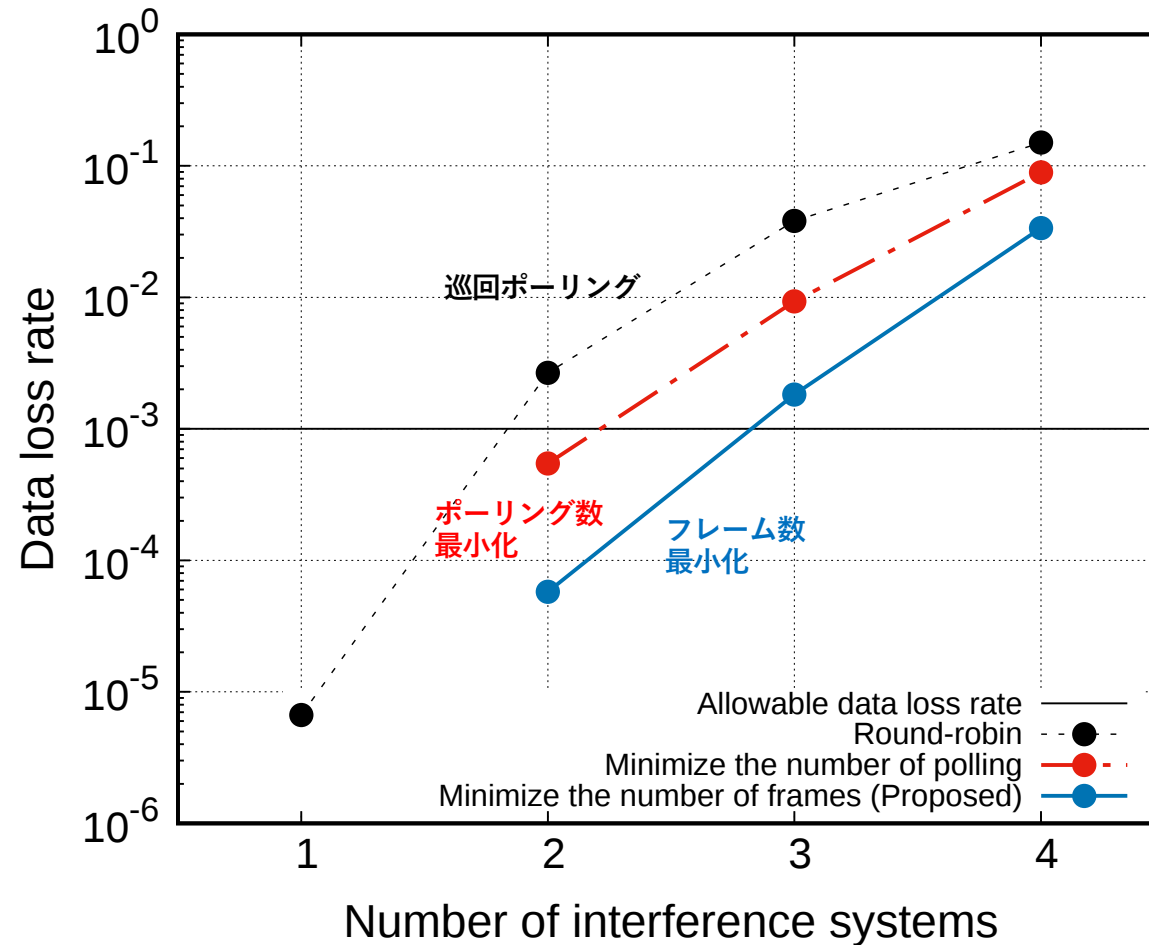
読み出し周期 (ms)	108	72	56	24
スレーブ端末 1	2	10	12	16
スレーブ端末 2	8	10	14	14
スレーブ端末 3	4	6	14	16
スレーブ端末 4	6	6	18	14
スレーブ端末 5	4	10	16	14



実装評価端末配置

周辺車両相当の干渉システムを増やしながらデータ集約の効果を検証

課題ア：簡易評価実験



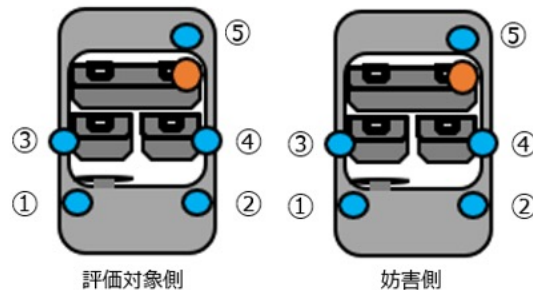
データ損失率特性（許容遅延 25 ms 以下， $\alpha = 0.5$ ）

位相調整データ集約による上りフレーム送信回数削減効果を確認

課題イ：UWB干渉評価・対策技術開発

● 車両によるUWB干渉評価

- ・ 各種走行モードにおける車内ノイズ測定と通信品質の測定
- ・ UWB 同士の干渉影響評価

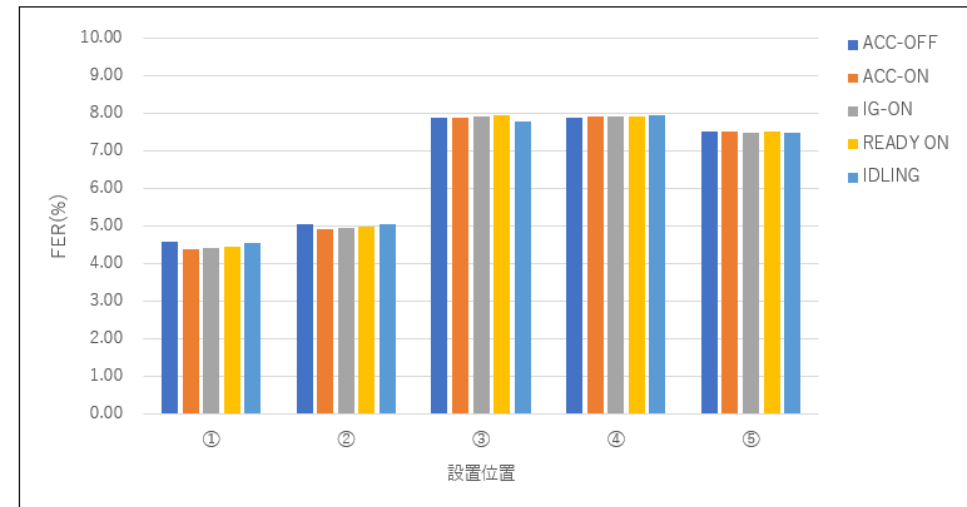


表：UWB 通信の FER (%)

設置位置 車両状態	①	②	③	④	⑤
ACC-OFF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ACC-ON	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
IG-ON	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
READY-ON	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
IDLING	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

全ての設置位置，車両状態に関わらず通信成功

UWB間干渉影響は大きい (FER 平均約 6 %)

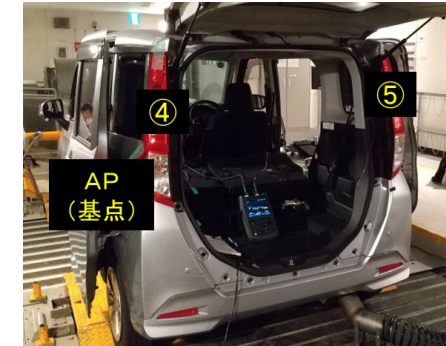
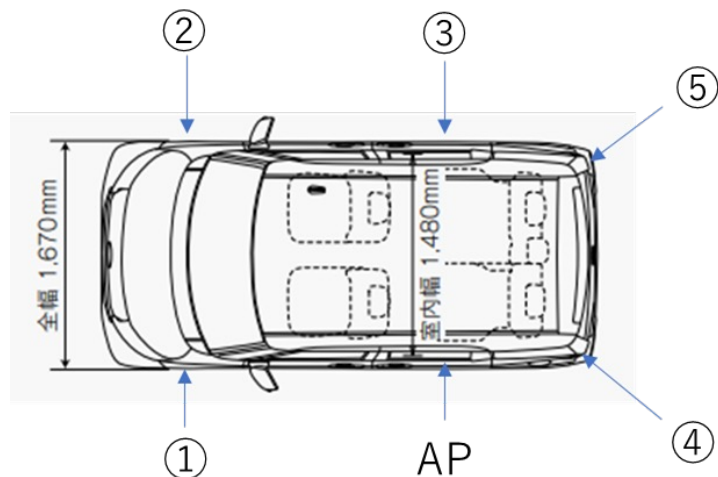


図：UWB 干渉下のFER (%)

● 技術開発

- ・ 干渉制御開発 (与干渉・被干渉の抑制)
- ・ 最適無線パラメータ決定
 - 送信電力，プリアンブル長，再送回数・タイミングの調査

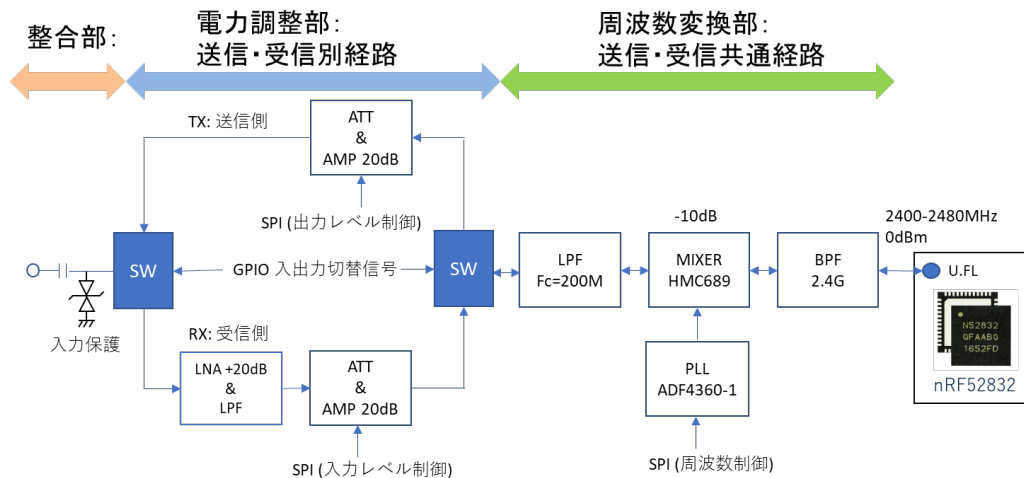
課題ウ：車載電源ライン向けPLC開発



AP（親局）及び子局の設置位置

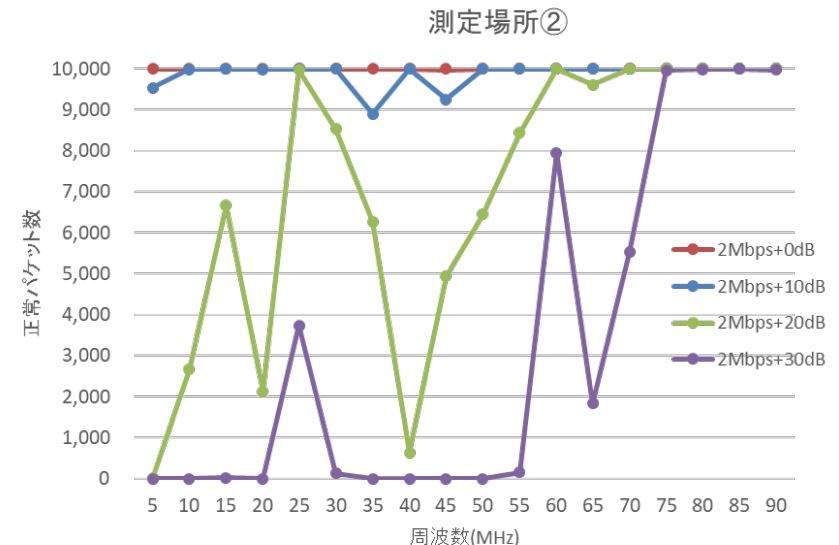
車種：トール（ダイハツ）

2.4 GHz 帯の無線モジュールの入出力を
100 MHz 以下に周波数変換する構成



PLCのブロック図

一定の送信電力があれば、周波数によらず
高い伝送品質が確保可能

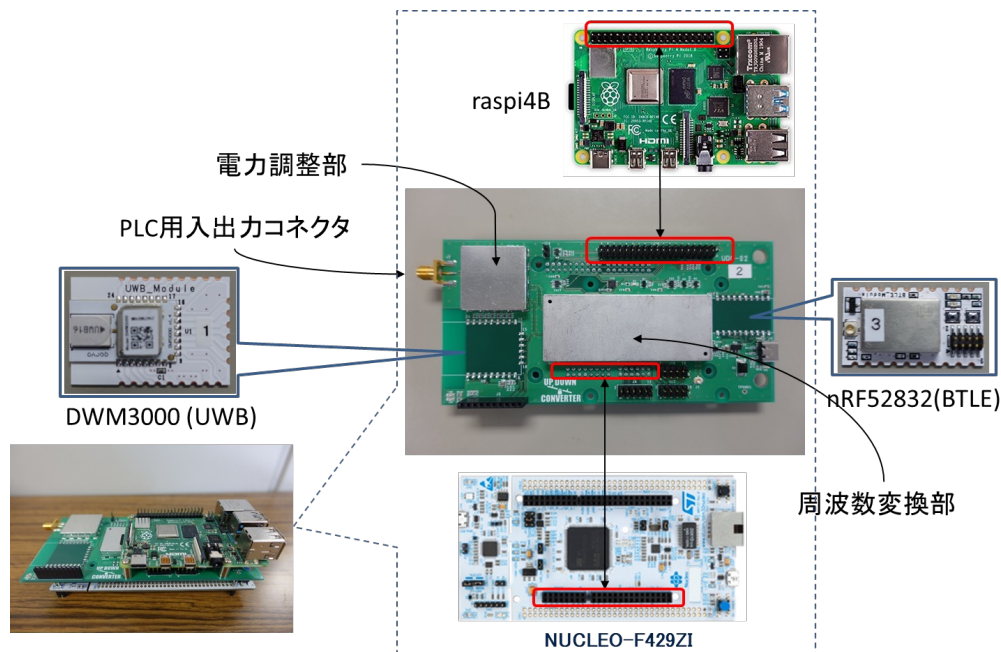


APと子局 ② 間の伝送評価

課題エ：統合実装とシステムレベル評価

● プロトタイプモデル評価系

- PLC と UWB の通信系を一体化
- Raspberry Pi や Nucleo などの評価ボードを利用することで、ハード開発工数を圧縮、ソフトの事前の評価系からの移植が容易な構成



UWB/PLC統合通信装置

● 車載評価系

- シャンシダイナモでの多様な走行モードでの評価
- 大規模電波暗室での車両間干渉評価
- 実走行実験による周辺環境被干渉評価
 - 技適取得必要



ラボテックインターナショナル 紀州ラボ電波暗室

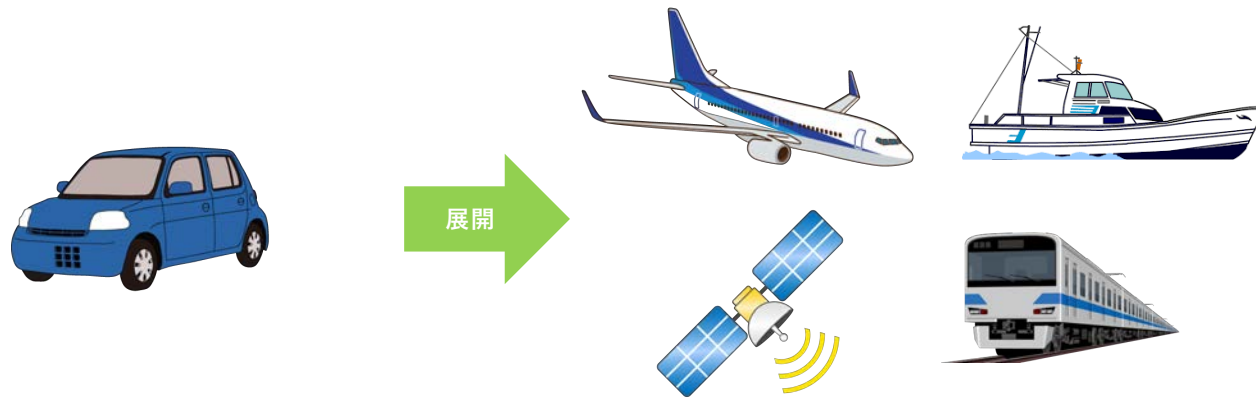
まとめ

● UWB/PLC 統合利用技術の開発

- フレーム数削減ポーリングスケジューリングにより UWB データロス率を改善
- 各種走行モードにおける UWB 通信品質の測定と品質改善対策を実施
- PLC において設置位置によらず 2 Mbit/s でも高い通信品質を実現
- UWB/PLC 統合実装とシステムレベル評価（実施中）

● プロジェクトの発展性

- 通信の信頼性が重要で軽量化にメリットがある様々な機器に適用可能



以上

関連研究

● スケジューラ関係

・ 車載UWBセンサネット [1]

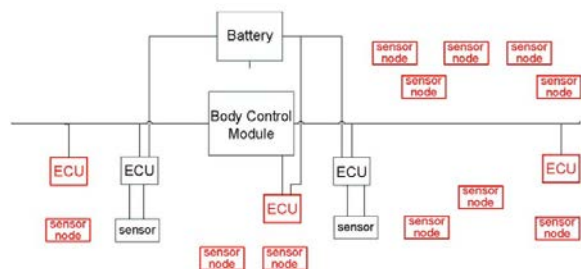


Fig. 1. Envisioned vehicle architecture. Sensor nodes and ECUs that have no wired connection with neither ECUs nor sensor nodes, respectively, have a wireless interface. The wireless sensor nodes will connect to one of the ECUs with wireless interface.

- 周期生成データを考慮
- 生成周期は基本周期の整数倍に限定
- 再送や変調速度変更対応のためサブフレーム内の割当送信時間を均一化

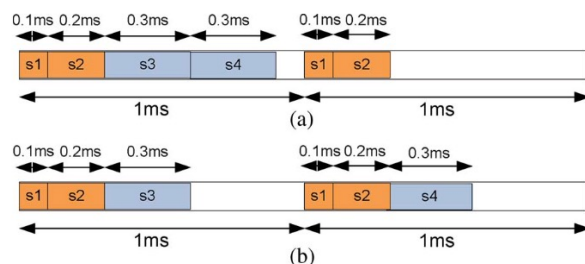


Fig. 3. Adaptivity requirement. (a) EDF scheduling. (b) Alternative schedule that uniformly distributes the allocation of time slots over time.

[1] Yalcin Sadi et al., "Optimal Power Control, Rate Adaptation, and Scheduling for UWB-Based Intravehicular Wireless Sensor Networks," IEEE T. on VT, vol. 62, no. 1, Jan. 2013.

・ バイタルセンシング [2]

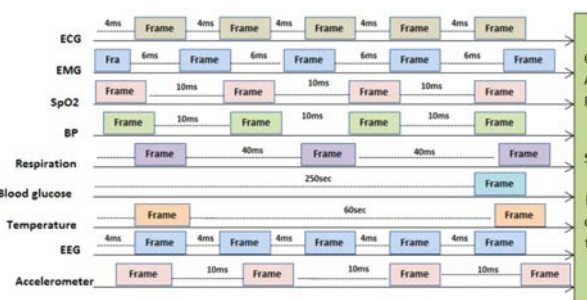


Figure 1. Channel access mapping of bio-medical devices for slotted CSMA/CA in a CAP slot.

[2] M. S. Akbar et al., "IEEE 802.15.4 Frame Aggregation Enhancement to Provide High Performance in Life-Critical Patient Monitoring Systems," Sensors, vol. 17, no. 2, Jan. 2017.

● PLC関係

- ・ HD-PLC (High Definition-PLC) 応用 [3,4]
- ・ EV (Electric Vehicle) 高圧配線評価 [5]
- ・ 整合回路理論検討 [6]

- [3] 井形 他, "オートモーティブ分野における PLC (Power Line Communication) 技術の応用展開," Panasonic Tech. J., vol. 57, no. 3, pp. 36-38, Oct. 2011.
- [4] 大井 他, "車載ネットワークにおける HD-PLC のマルチプルアクセス性能評価," 信技法CS2014-81, Jan. 2015.
- [5] A. Pittolo et al., "In-Vehicle Power Line Communication: Differences and Similarities Among the In-Car and the In-Ship Scenarios," IEEE V. T. Mag., vol. 11, no. 2, June 2016.
- [6] B. Wang et al., "Design and Evaluation of a T-Shaped Adaptive Impedance Matching System for Vehicular Power Line Communication," IEEE Access, vol. 8, April 2020.

- 周期生成データを考慮
- フレーム集約, 同スロット生成データフレームをまとめることでオーバーヘッド削減

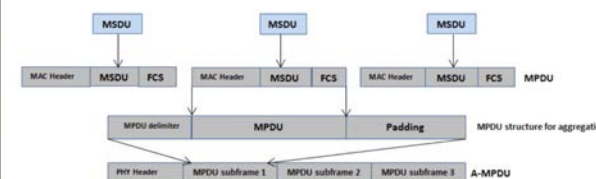


Figure 5. Frame aggregation mechanism.

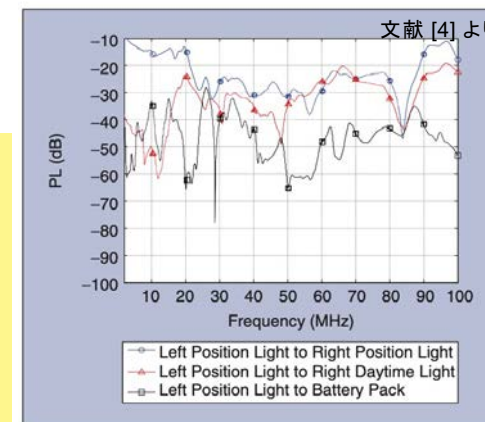


FIGURE 2 The path loss (PL) of three representative in-car channels [11].