

第41回情報理論とその応用シンポジウム
若手研究者のための講演会

確率的電源を用いた 無線通信の理論と実際

石橋 功至

電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター
The University of Electro-Communications
Advanced Wireless & Communication Research Center (AWCC)

著作権の対応のため削除

Guglielmo Marconi

著作権の対応のため削除



IoT時代の到来

amazon dash



Audi connect

TESLA



iITS
CONNECT



BMW ConnectedDrive

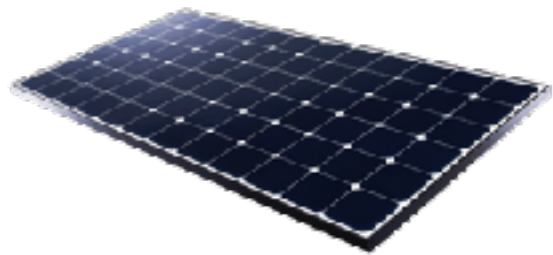


無線端末は本当に**無線**？

著作権の対応のため削除

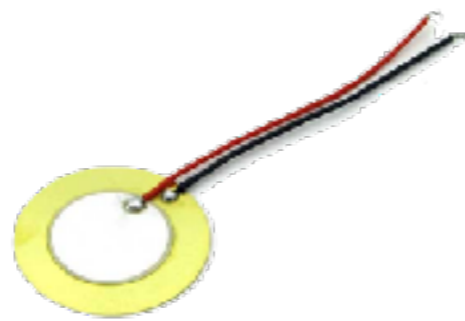
環境発電

光



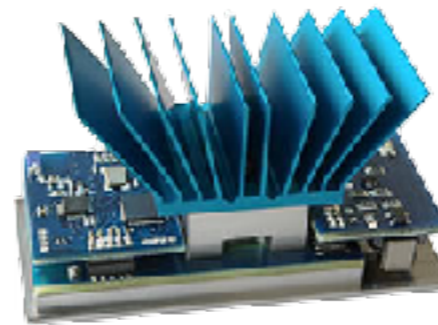
太陽電池で
光を電気に
変換

振動



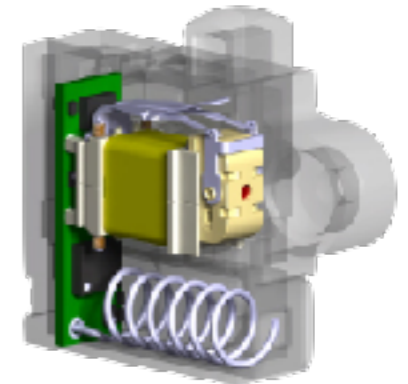
圧電素子で
圧力を電気に
変換

熱



熱電素子で
熱を電気に
変換

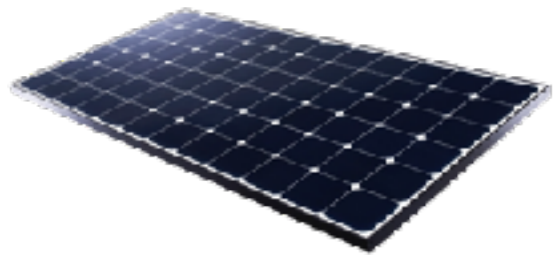
スイッチ



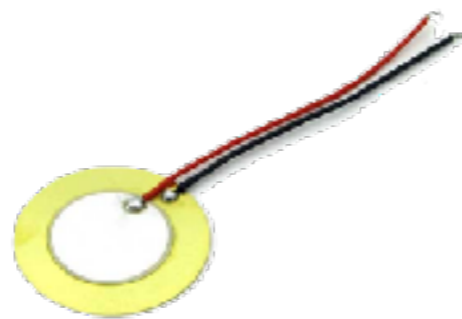
電磁誘導で
仕事を電気に
変換

環境発電

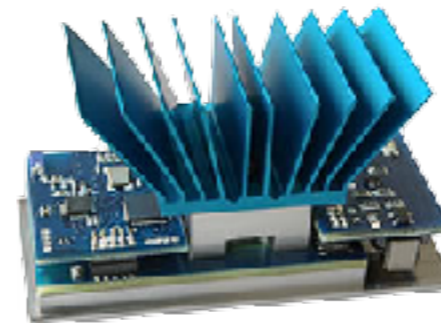
光



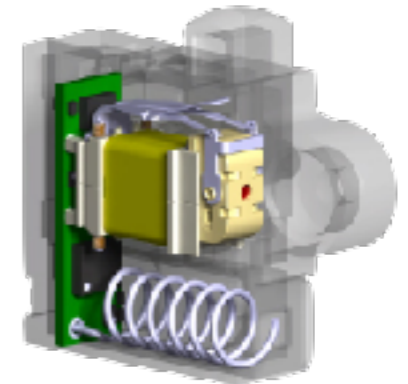
振動



熱



スイッチ



周囲の環境からエネルギーを得ることで電池切れなし

環境発電 = 確率的電源

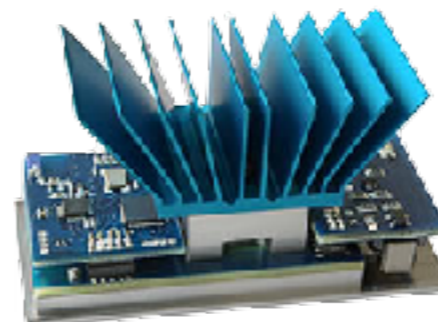
光



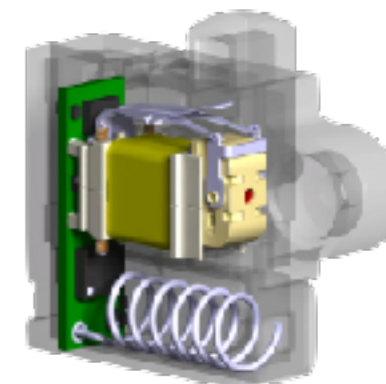
振動



熱



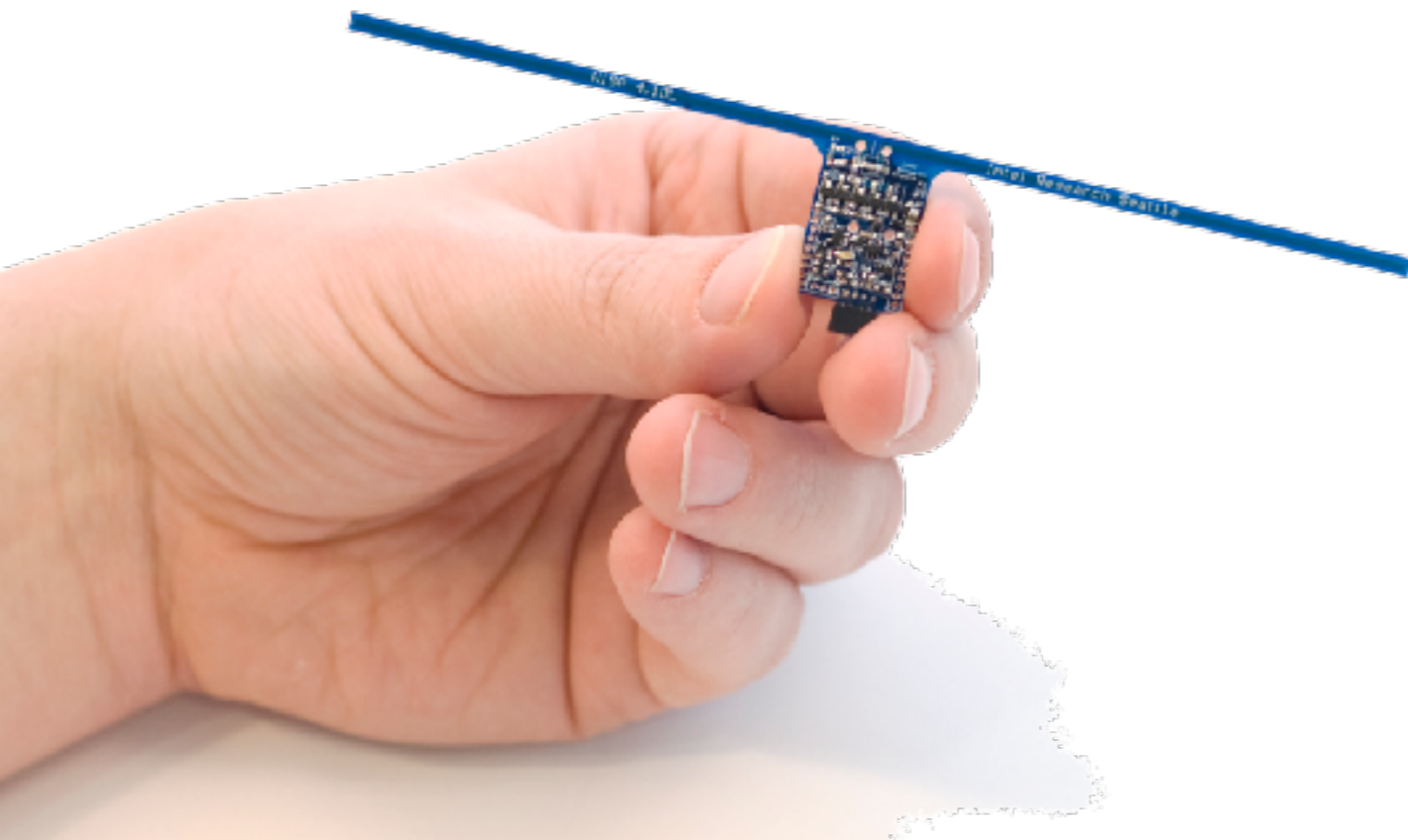
スイッチ



いつどのタイミングでどれだけのエネルギーが手に入るかは確率的であり、コントロールができない。

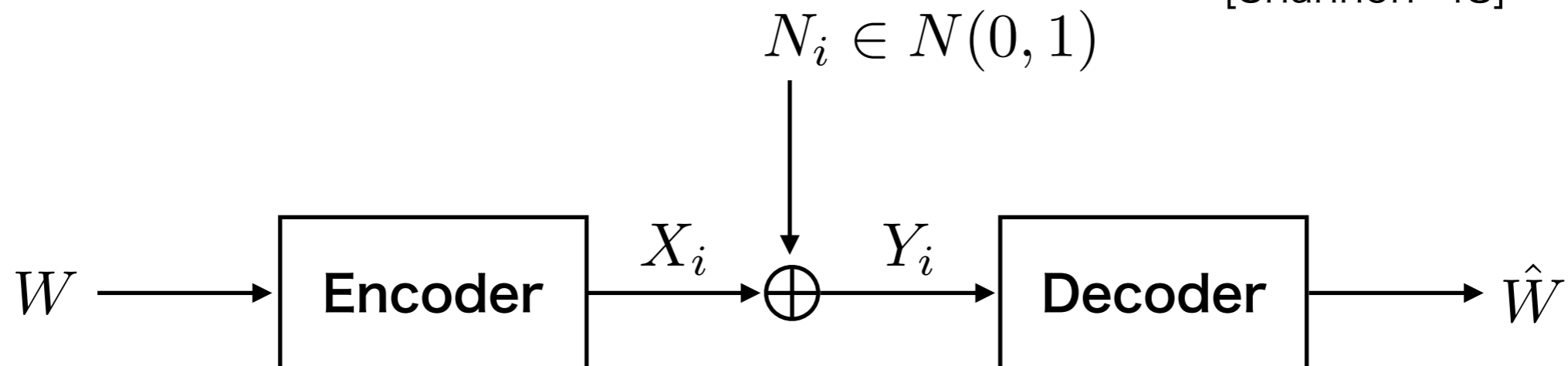
浮遊電磁波

- ・ 整流回路を用いた環境発電
- ・ 最大の違いは：エネルギー源を制御可能
- ・ ただし、どれだけの電力を伝送できるかは通信路状態に依存し、そのような意味では「確率的電源」



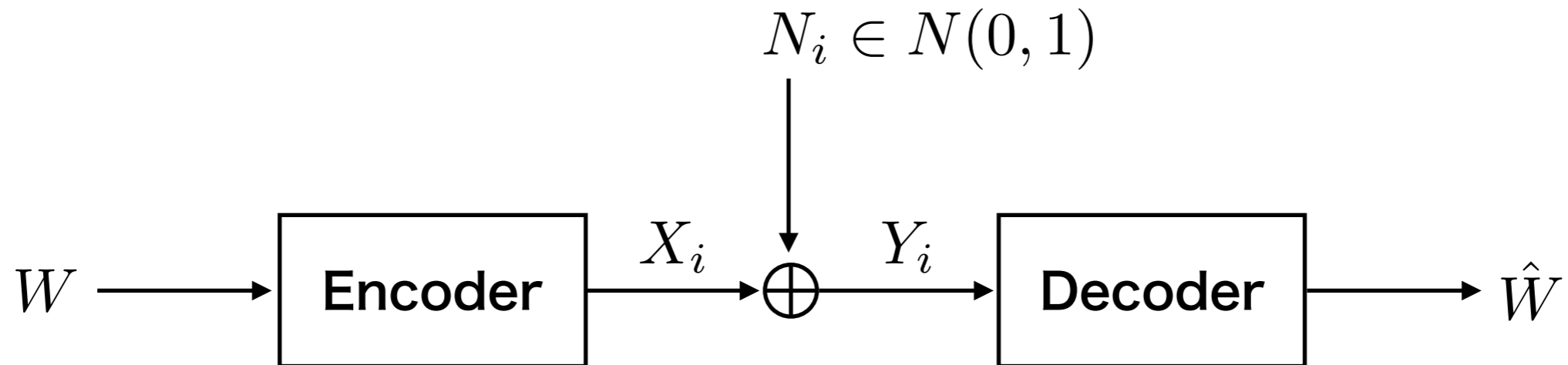
平均電力制約通信路

[Shannon '48]



平均電力制約：
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \leq P$$

平均電力制約通信路

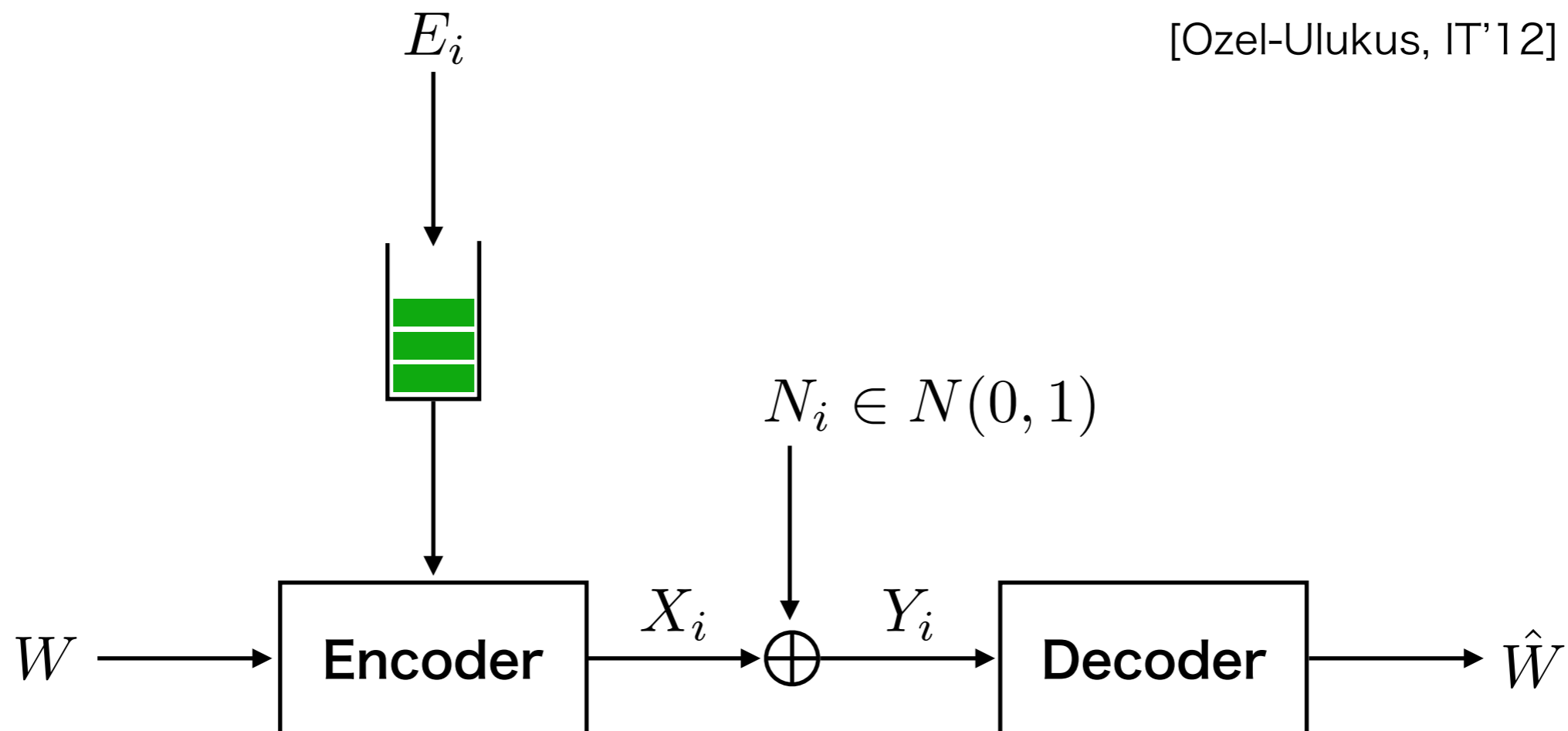


平均電力制約：
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \leq P$$

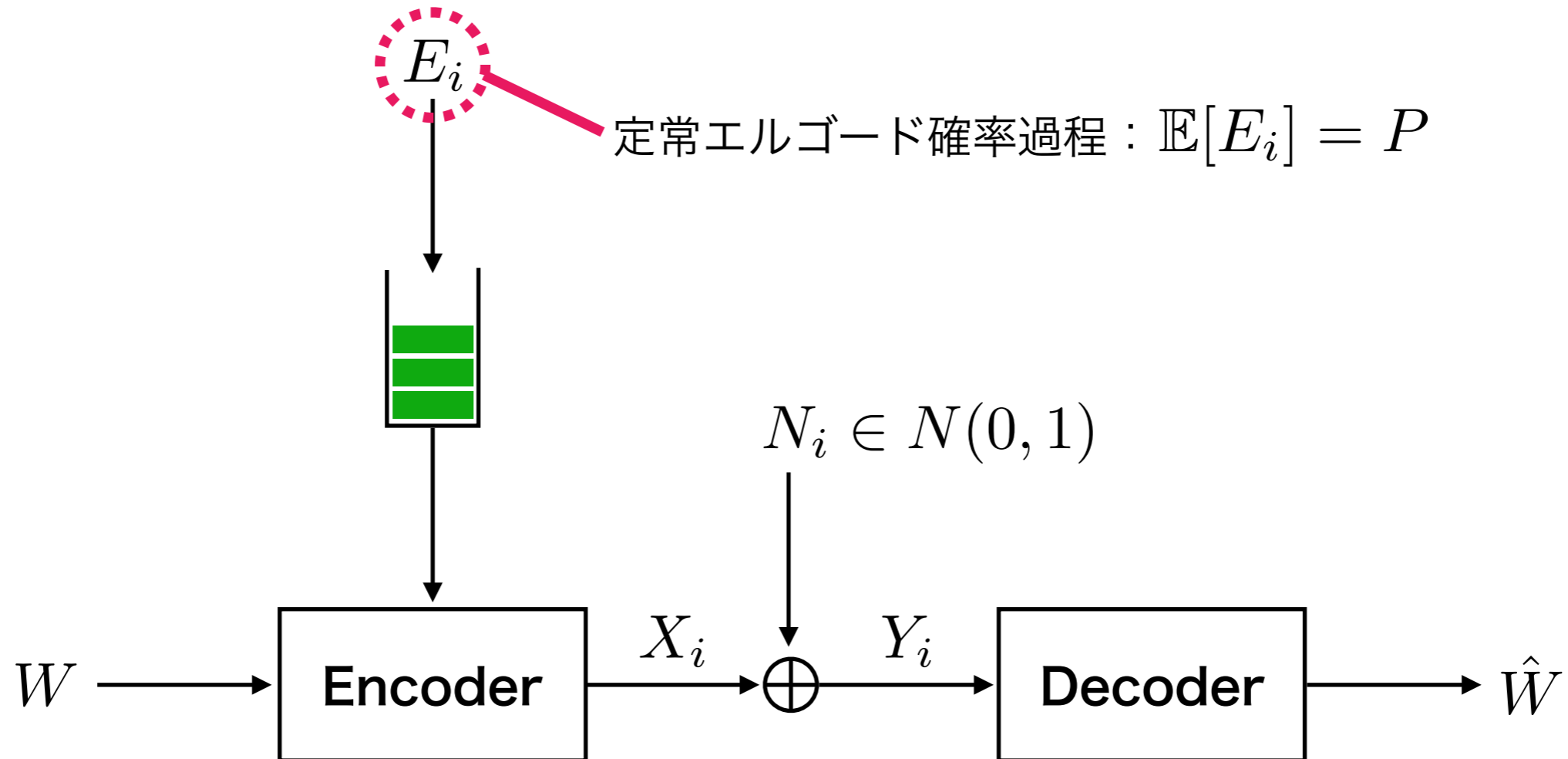
通信路容量：
$$C = \frac{1}{2} \log(1 + P)$$

確率的電源を用いた通信路

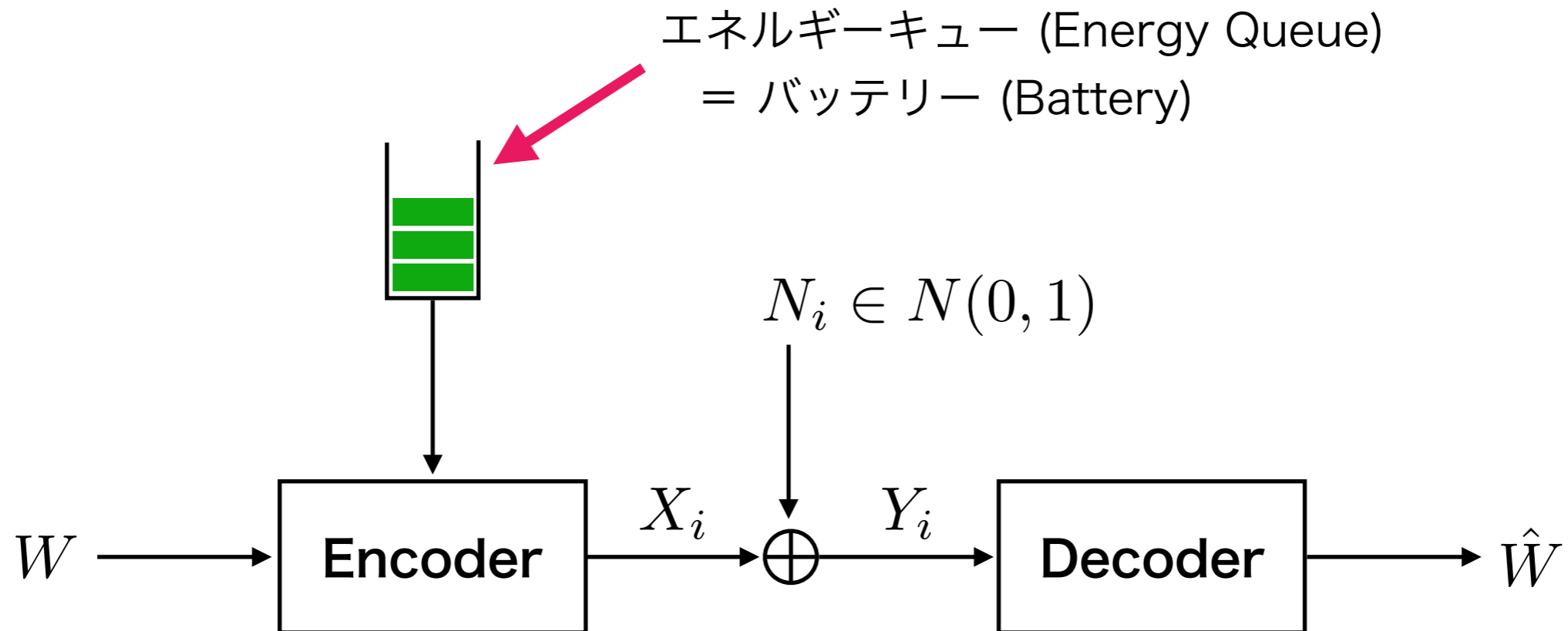
[Ozel-Ulukus, IT'12]



確率的電源モデル

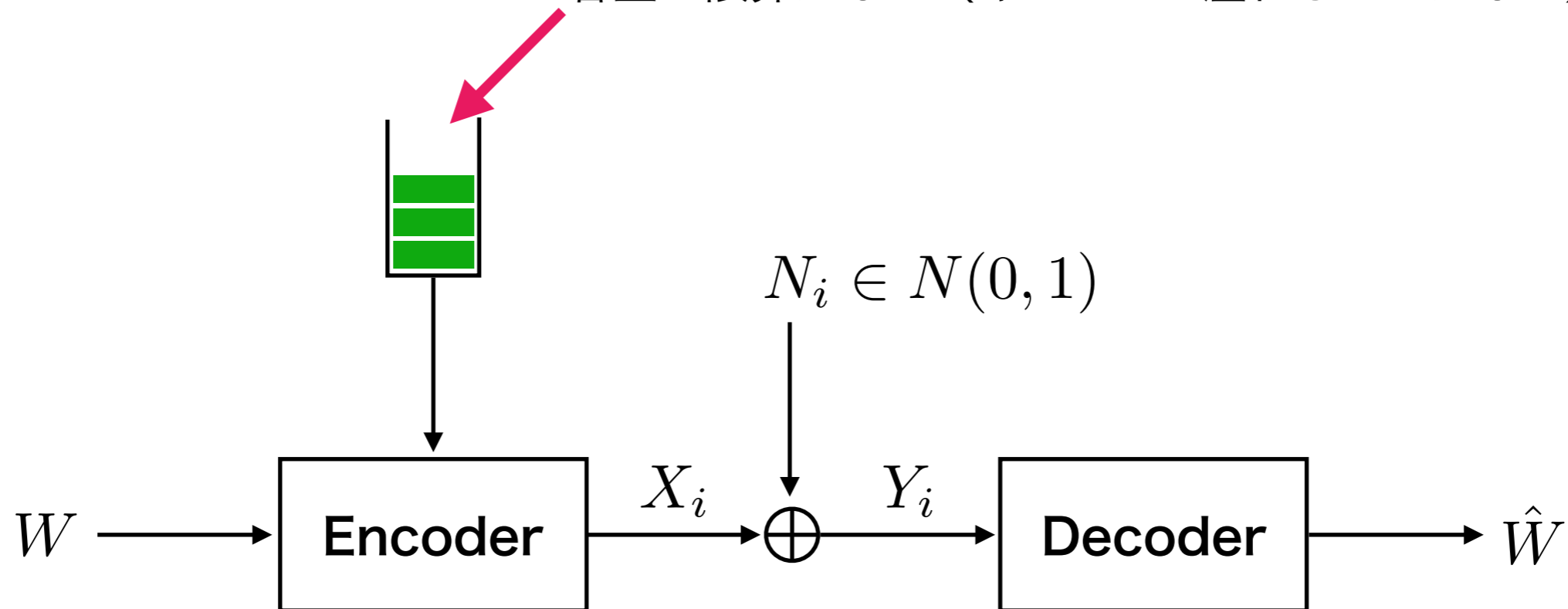


確率的電源モデル

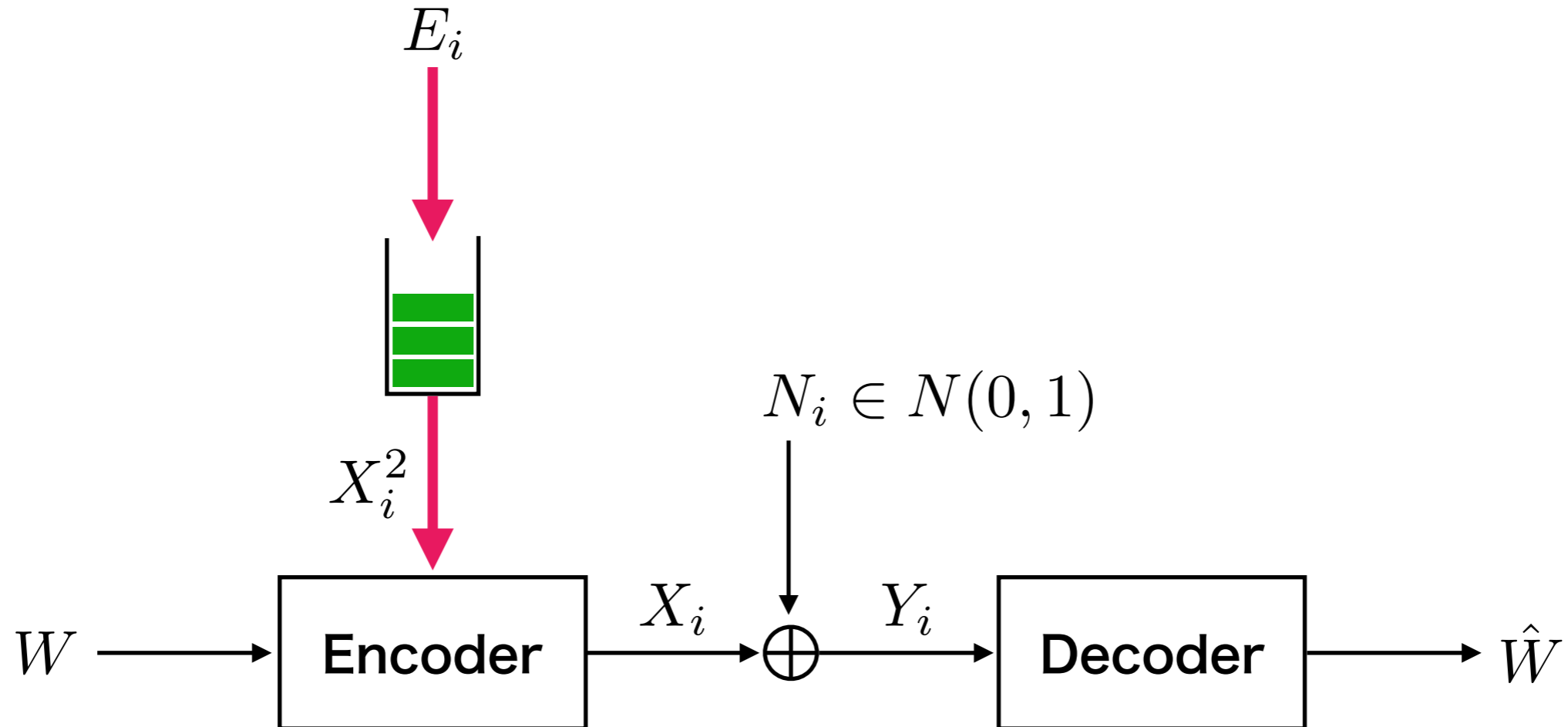


確率的電源モデル

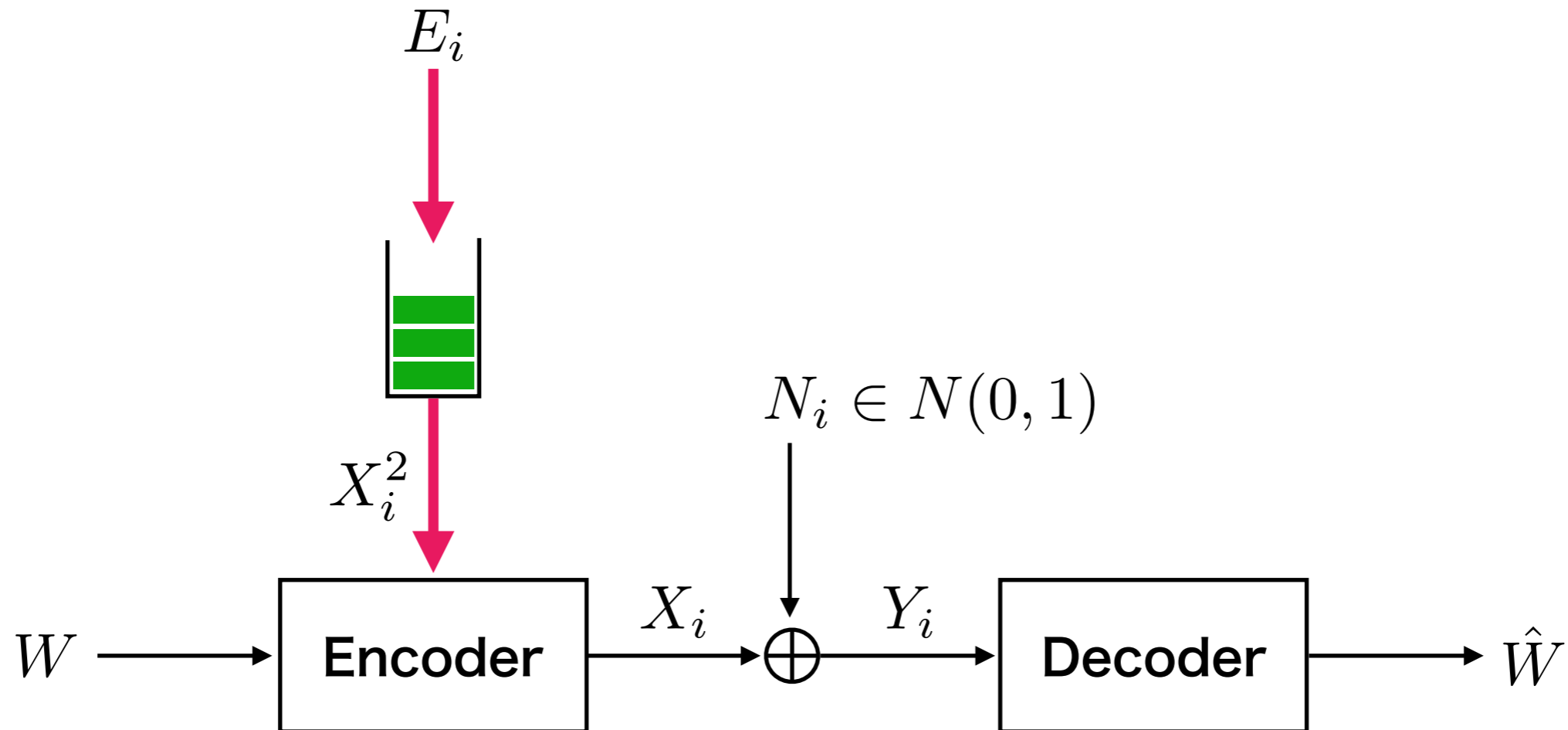
容量に限界がない (キューから溢れることがない)



確率的電源モデル



電力量因果性制約

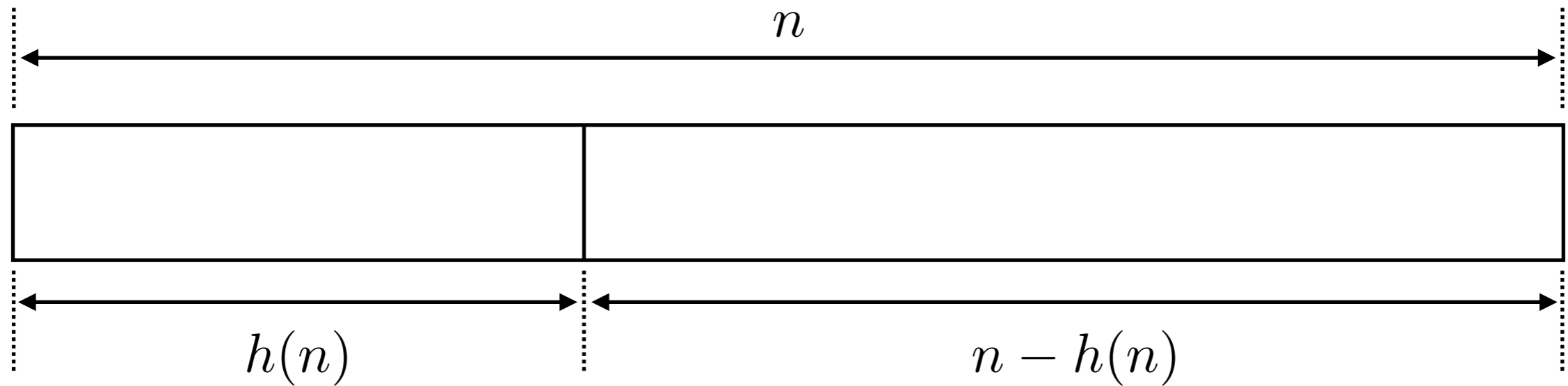


電力量因果性制約 (Energy Causality Constraints)

$$\sum_{i=1}^k X_i^2 \leq \sum_{i=1}^k E_i$$

具体的な達成手法

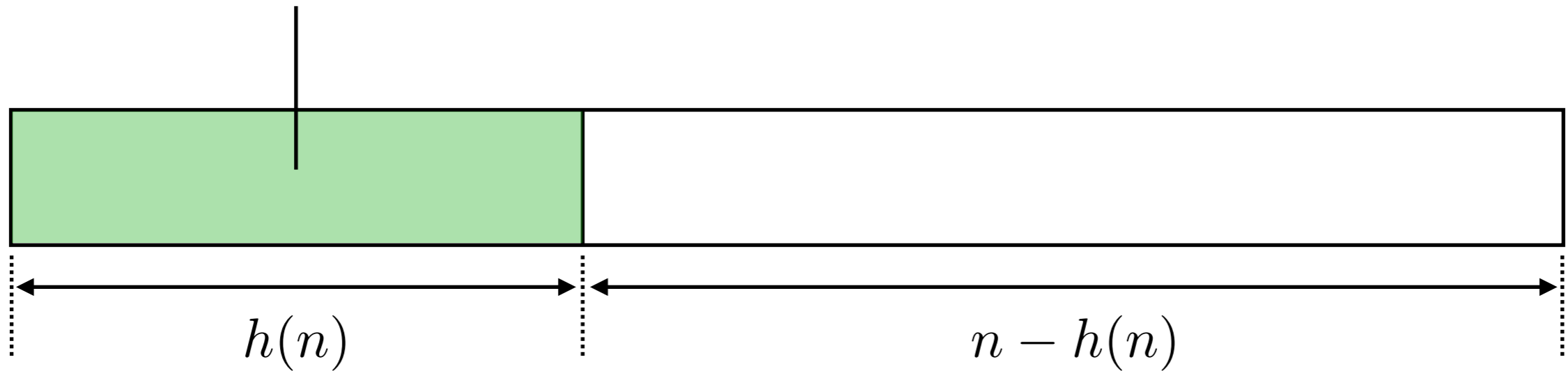
Save-and-Transmit



具体的な達成手法

Save-and-Transmit

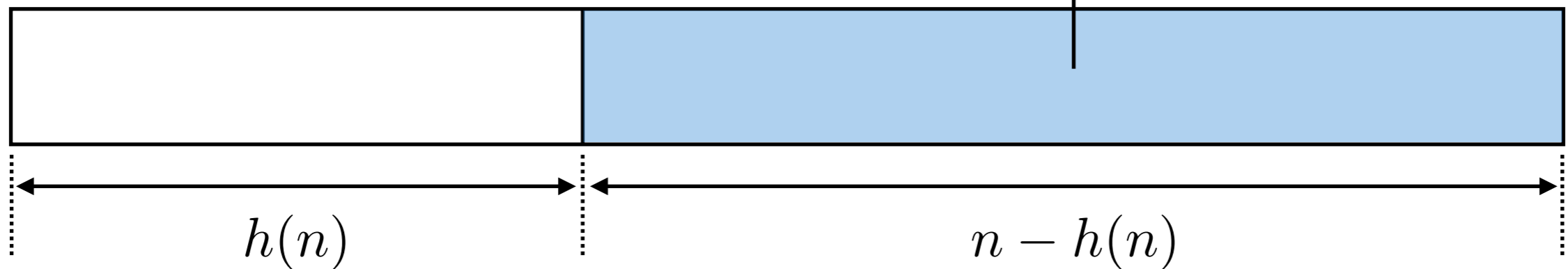
何もしない



具体的な達成手法

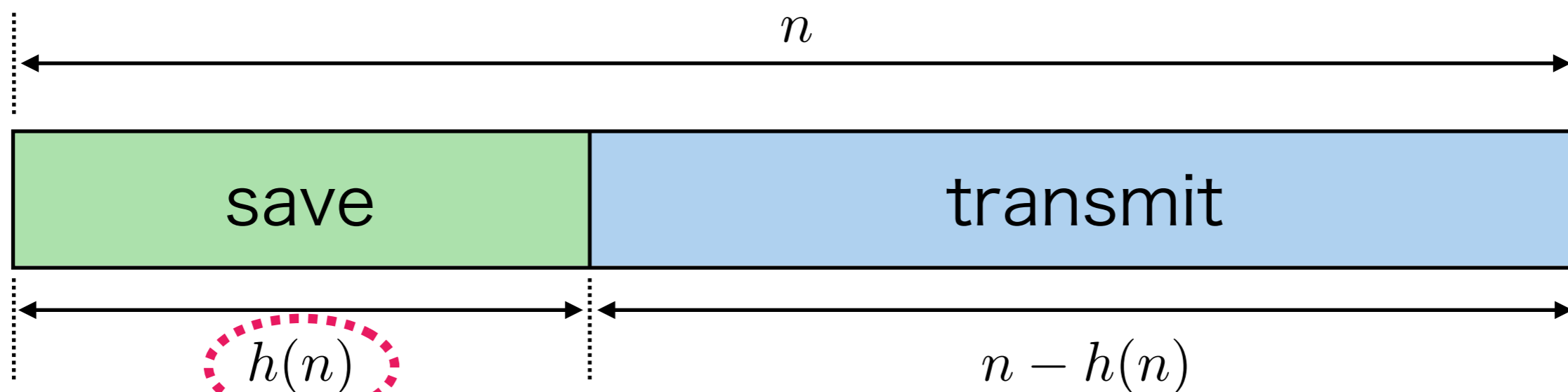
Save-and-Transmit

送信電力 P の i.i.d. ガウス分布
に従う信号を送信



具体的な達成手法

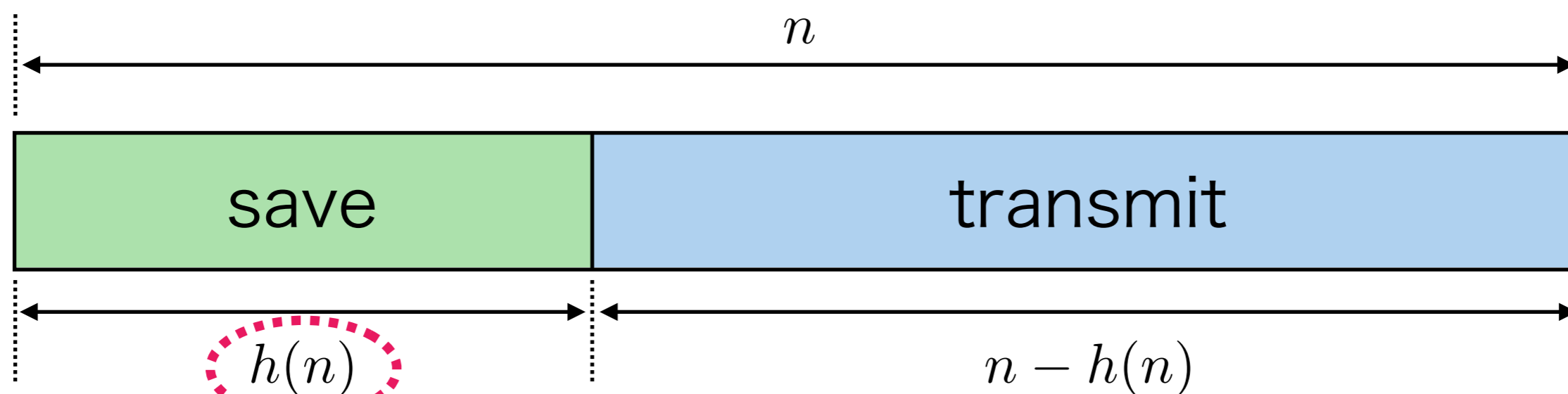
Save-and-Transmit



$o(n)$ の関数で選択する。たとえば $\log(n)$

具体的な達成手法

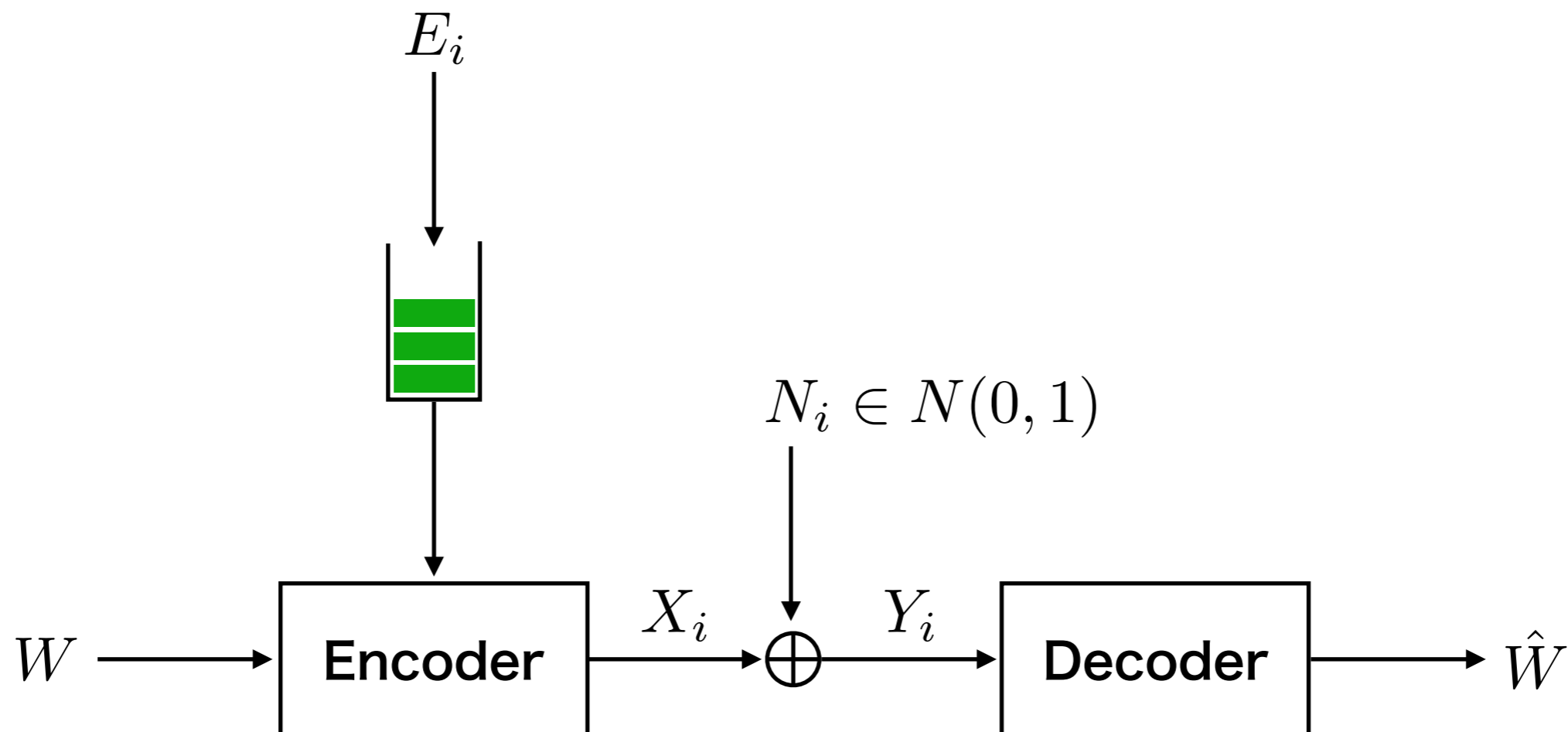
Save-and-Transmit



$o(n)$ の関数で選択する。たとえば $\log(n)$

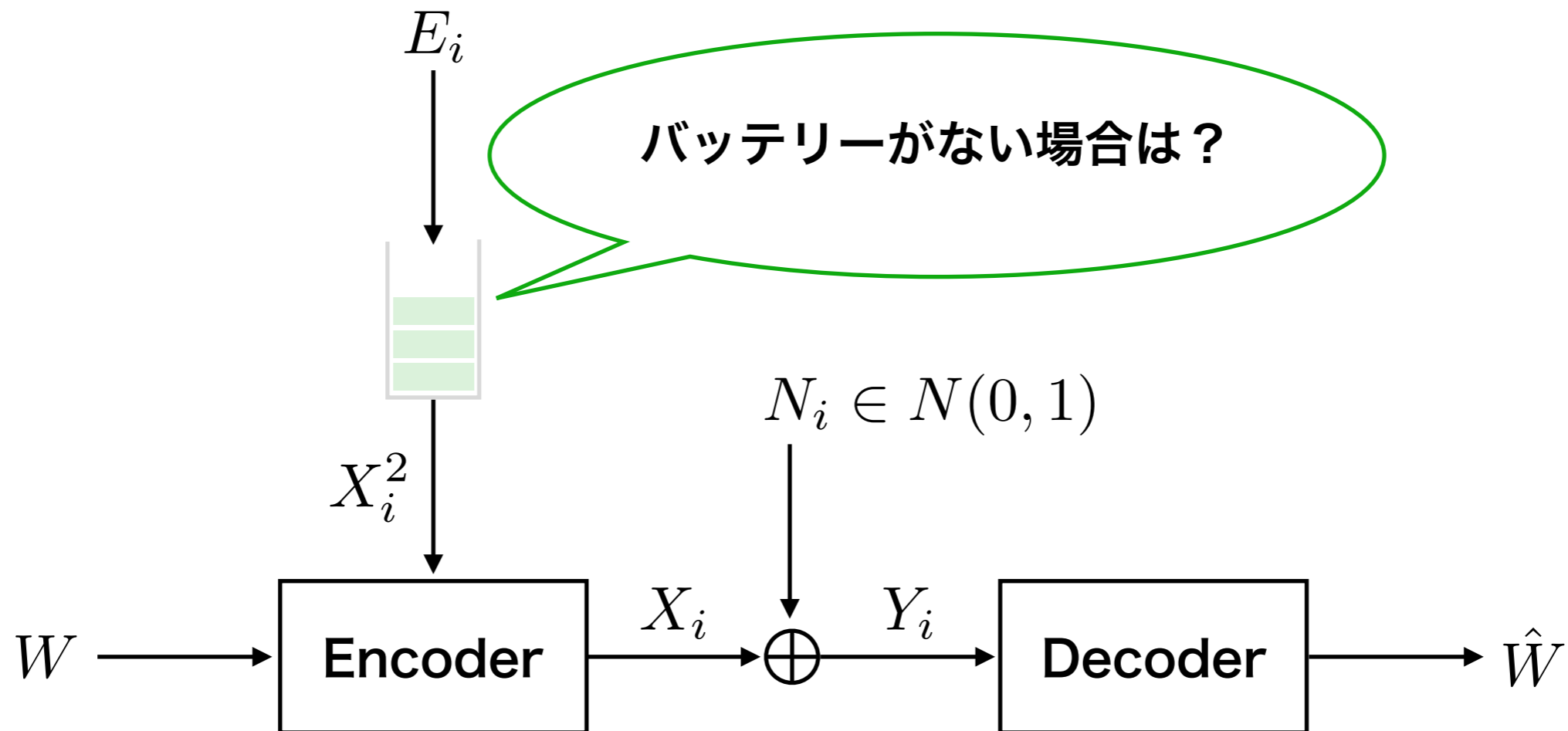
n が無限大の場合、saving phaseにおいてバッテリーに保持される電力が無限大となり、data transmission phaseにおいて電力が不足する確率がゼロとなる

電力量因果性制約を持つ通信路

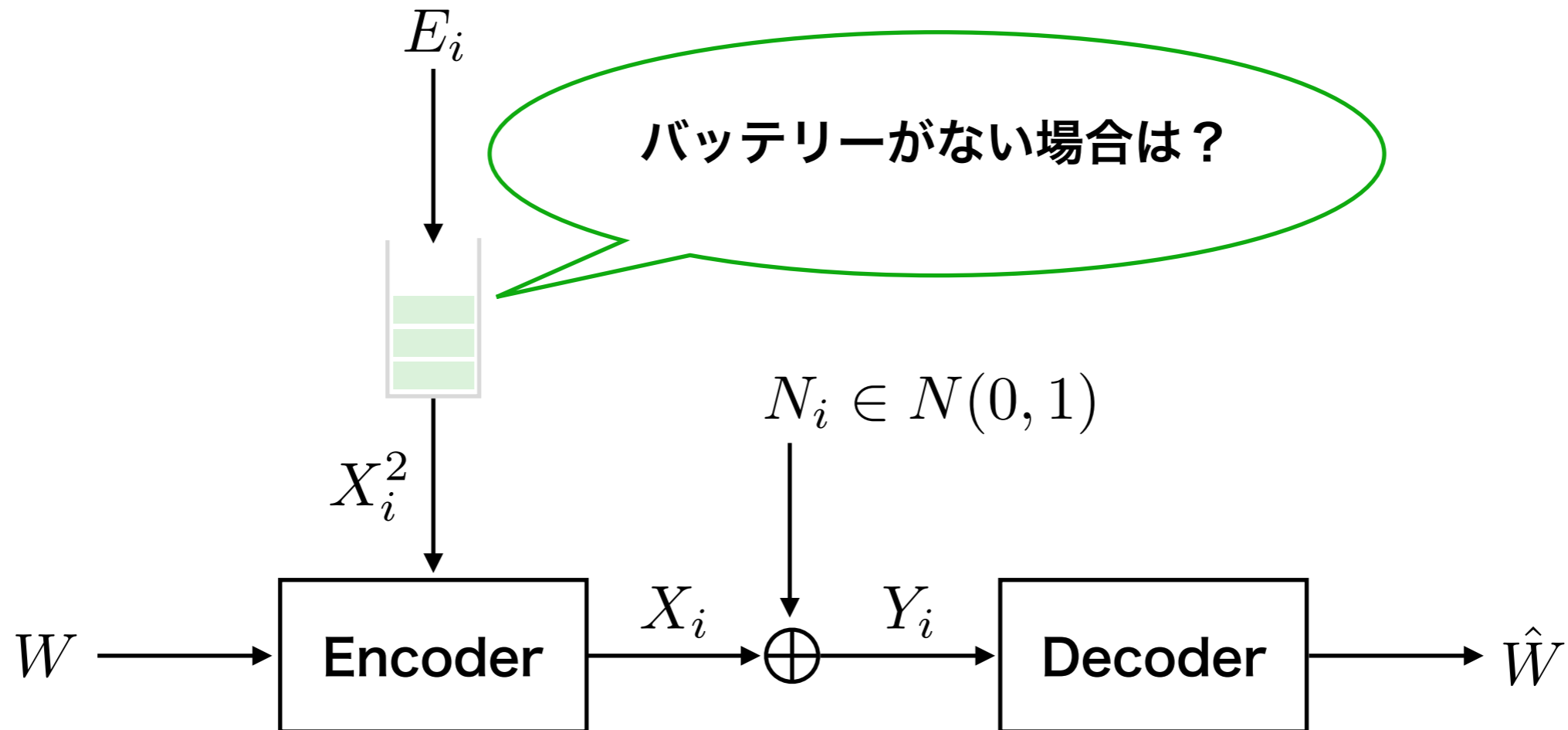


通信路容量 : $C = \frac{1}{2} \log(1 + P)$

確率的電力モデル (その2)



瞬時確率的振幅制約



瞬時確率的振幅制約 (Instantaneous Stochastic Amplitude Constraints)

$$X_i^2 \leq E_i$$

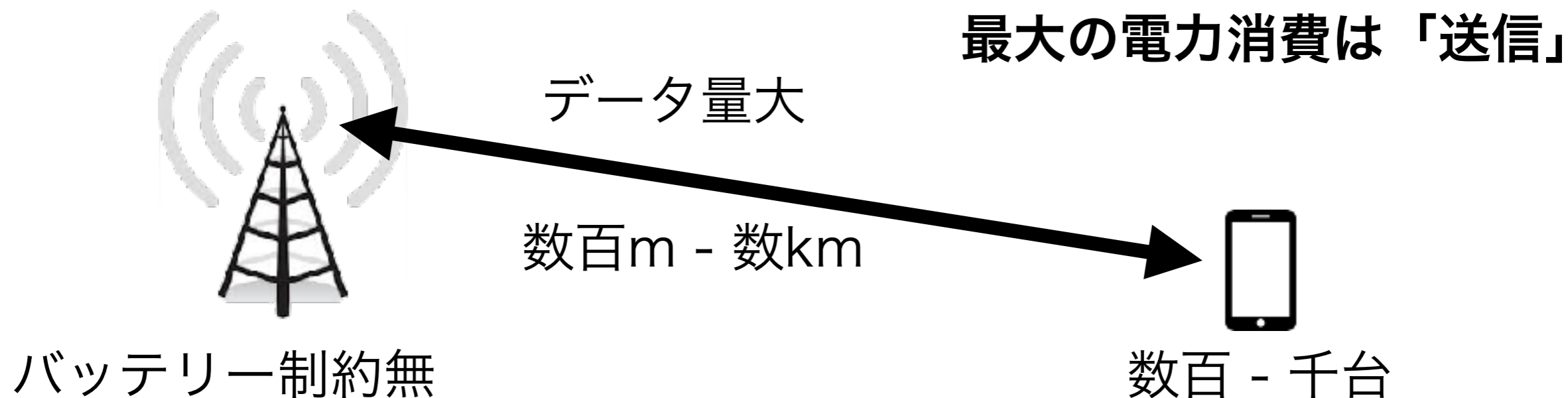
瞬時確率的振幅制約下の通信路容量

- ・ [Ozel-Ulukus Asilomar'11]
 - ・ ピーク電力制約下におけるSmithの結果 [Smith '65]を拡張
 - ・ 入力信号は離散分布が最適となり、バッテリーのあるケースと比較すると大きく容量が低下

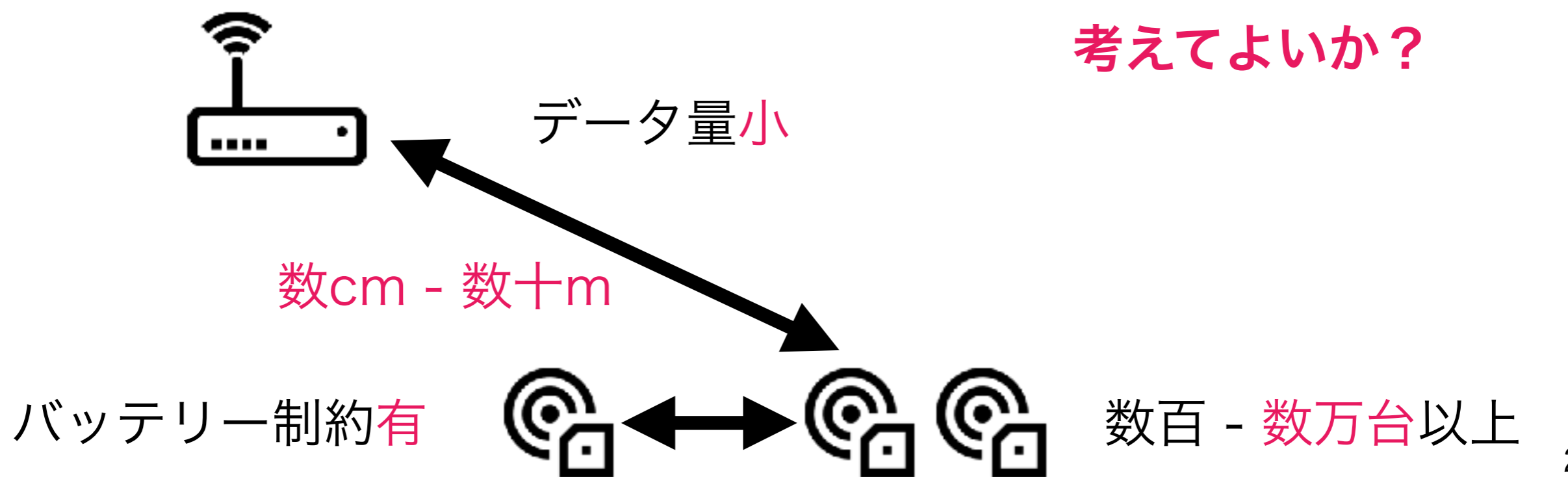
著作権の対応のため削除

確率的電源通信の実際

従来システムの例



確率的電源を持つシステムの例



通信モジュールの消費電力

市販品 ZigBee (IEEE 802.15.4) モジュール

	動作電圧	消費電力	送信電力
ZB24TM-Z (NEC)	DC 3.0V 推奨 DC 2.1V ~ 3.6V	Tx:35mA Rx:28mA Sleep:1.6uA	最大 4.8[dBm] (3mW)
ML72220-01 (LAPIS)	DC 3.0V 推奨 DC 2.7V ~ 3.6V	Tx:30mA Rx:30mA Sleep:20uA	0 [dBm]
LBBA0ZZ1EU (村田製作所)	DC 3.0 ~ 5.0V	Tx:40mA(10dBm) Rx:18.5mA Sleep:10uA	最大10[dBm]

市販品 Bluetooth Low Energy (BLE) モジュール

	動作電圧	消費電力	送信電力
WVC-BLE-C1010 (ウィビコム)	DC 3.3V 推奨 DC 1.8V ~ 3.6V	Tx:30mA Rx:20mA Sleep:6.0uA	8.0[dBm]
MK71050-03 (LAPIS)	DC 3.0V 推奨 DC 1.8V ~ 3.6V	Tx:10.9mA Rx:9mA Deep Sleep:0.8mA	0 [dBm]
RN42/RN42N (MICROCHIP)	DC 3.3V 推奨 DC 3.0V ~ 3.6V	Tx:30mA Rx:??? Sleep:26uA	4 [dBm]

送信・受信の消費電力がほとんど変わらない

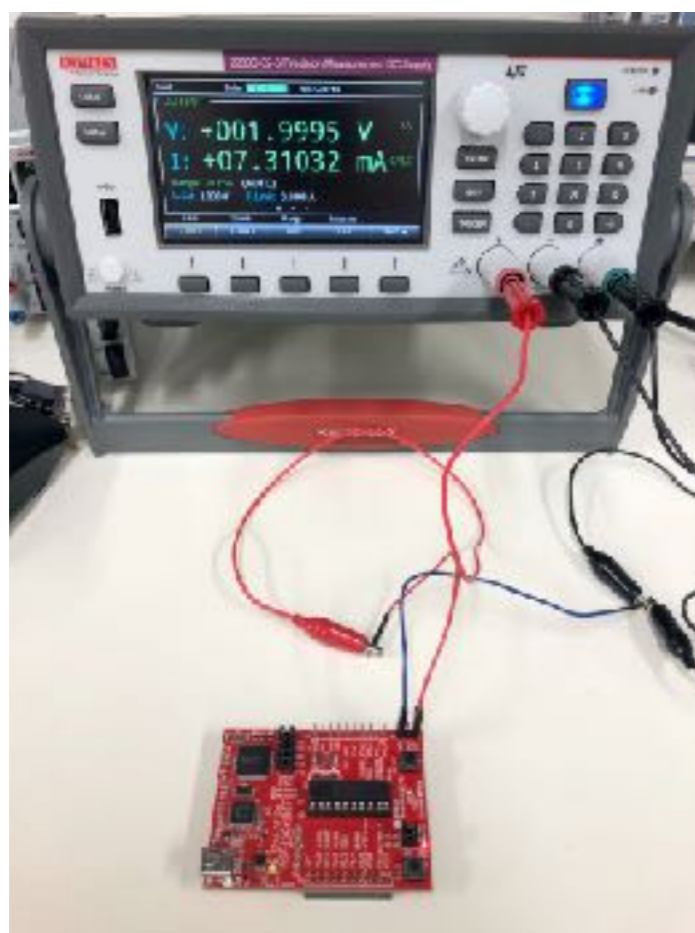
低電力MCUの消費電力

	動作電圧	消費電流 (*の印加電圧のとき)
ADuCM3029 (ANALOG DEVICES)	3.0V	30uA (1MHz動作時) 60nA (スリープ時)
ADuCM4050 (ANALOG DEVICES)	3.6V	41uA (1MHz動作時) 60nA (スリープ時)
MSP430 Series (TEXAS INSTRUMENTS)	1.8V~5.5V * 1.8V	100uA (1MHz動作時) 1uA (スリープ時)
ATmega328 (Arduino UNO)	1.8V~5.5V * 3.3V	3.5mA (8MHz動作時) 0.17mA (スリープ時)
CXD5602GG/CXD5247GF (SONY Spresense)	1.8V~3.3V * 1.0V	51uA (1MHz動作時) 26uA (スリープ時)
ML620Q503H/Q504H (Lazurite 920J)	1.8V~5.5V * 5.5V	25uA ((32.768kHz動作時) 0.8uA (スリープ時)
nanoWatt XLP (Microchip Technology)	3.0V	35uA (1MHz動作時) 20nA (スリープ時)
EFM32 Series (Silicon Labs)	3.0V	114uA (1MHz動作時) 20nA (スリープ時)

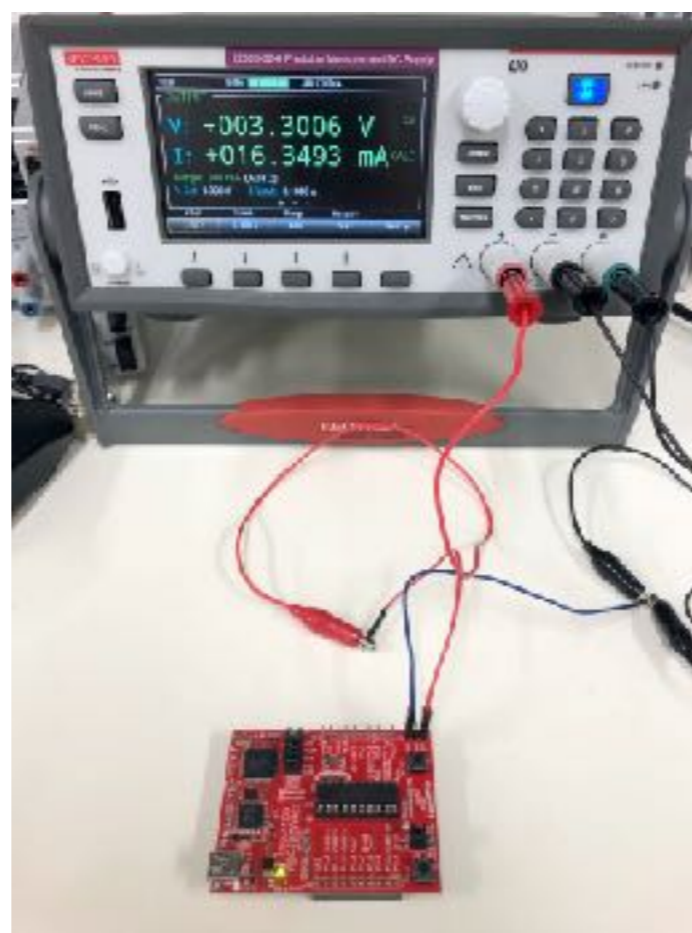
EHで与えられる電力に対して無視できないほど大きい

TEXAS INSTRUMENTS MSP430 Series-2実測結果

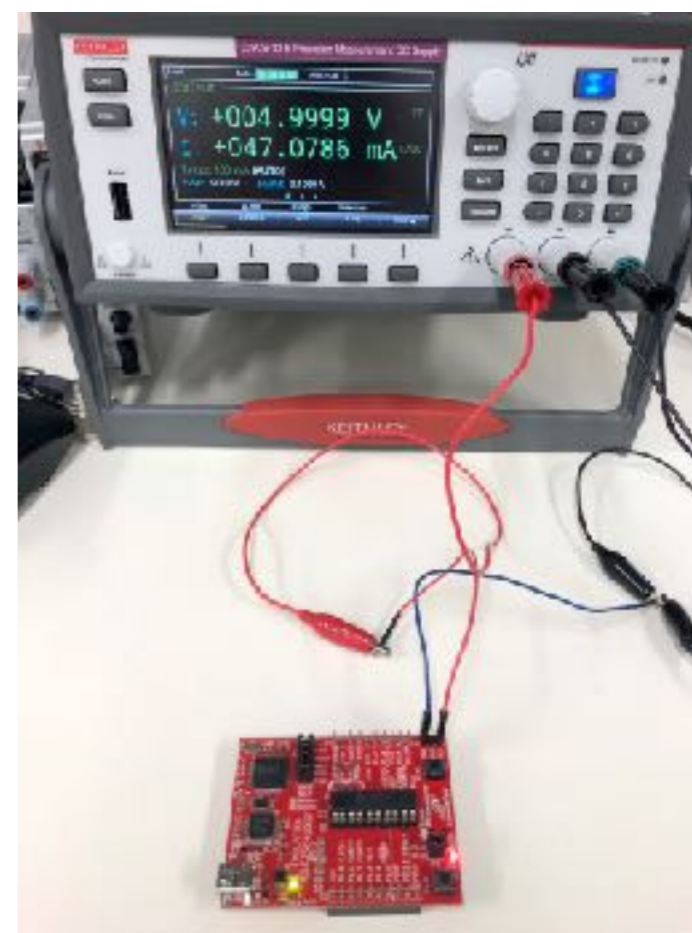
スタンバイ時, 電源LEDのみ点灯時の消費電力 (注: 評価ボード付)
動作可能電圧 (1.8V~5.5V)



2.0V
7.3mA



3.3V
16.3mA



5.0V
47.0mA

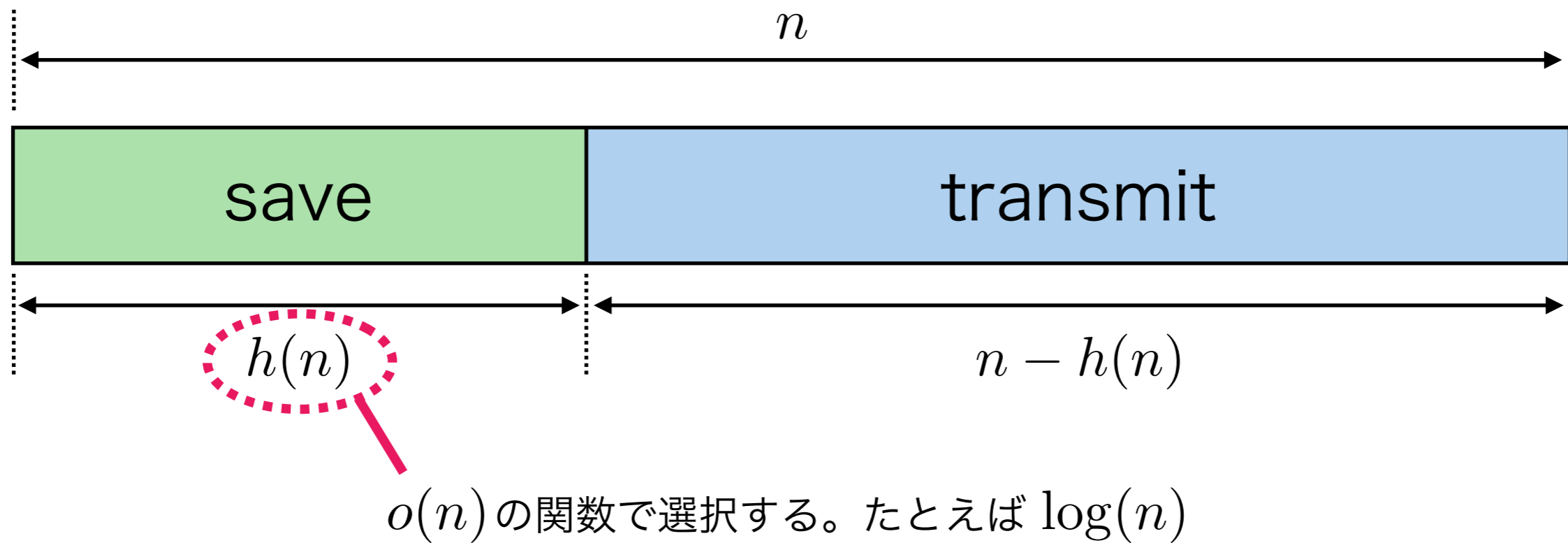
確率的電源を用いた通信の実際

- ・ 近距離で消費電力の小さい通信システムの設計においては回路での消費電力を無視できない
- ・ 符号化・復号化の回路規模や消費電力 [Grover et. al., JSAC'11][Grover et al., ISIT'12][Blake-Kschischang, IT'15][Blake-Kschischang, ISIT'16]
 - ・ ThompsonのGrid Model [Thompson, '80]
- ・ 増幅回路の効率・制約 [Ochiai, TCOM'13]
- ・ ADコンバータでの電力消費量 [Le et. al., SPM'05]

情報鮮度 (Aol)

- ・ 実際の通信では、その情報が生成されてから、どれだけの時間が経過したかが重要な場合がある
- ・ **情報鮮度 (Aol : Age of Information)**
 - ・ 例：三日前の台風情報を今日聞いても役に立たない

Save-and-Transmitの問題

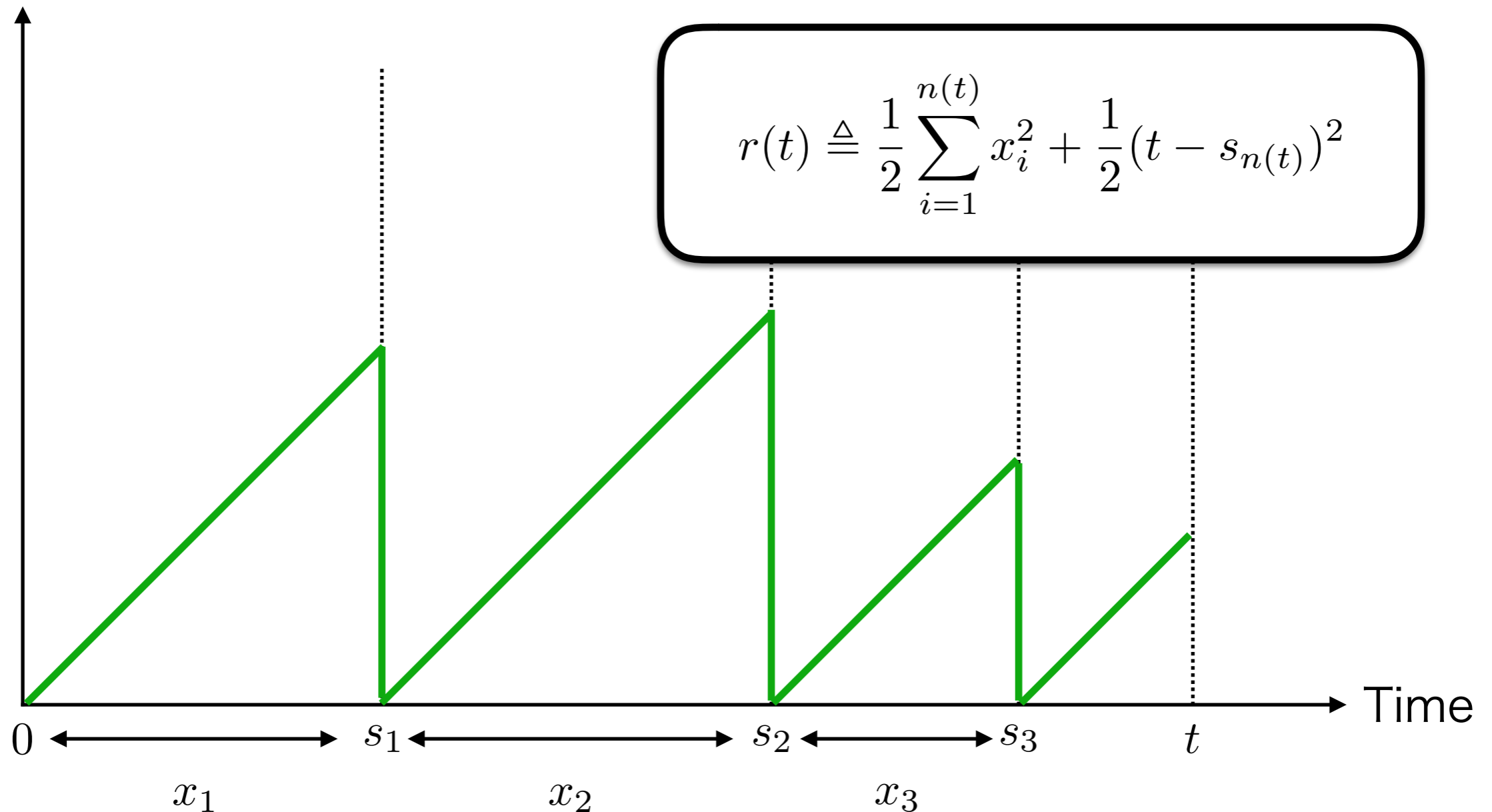


情報鮮度 (Aol)

- ・ 実際の通信では，その情報が生成されてから，どれだけの時間が経過したかが重要な場合がある
- ・ **情報鮮度 (Aol : Age of Information)**
 - ・ 例：三日前の台風情報を今日聞いても役に立たない
- ・ Aolを指標とした環境発電を用いた通信設計が最近活発に検討されており，今後さらに論文がでると思われる [Arafa et. al., Asilomar'17][Arafa et. al., ITA'18]

Age-Minimal Policy

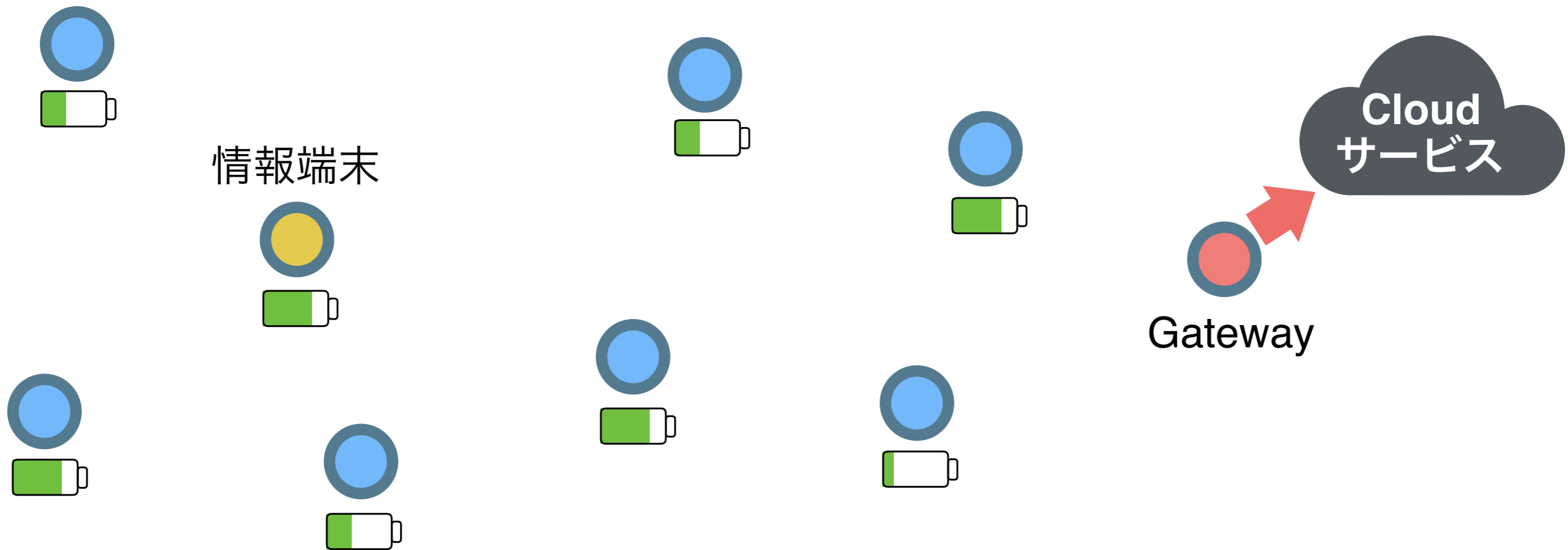
Age: $a(t) \triangleq t - u(t)$



$$\bar{r} \triangleq \min_{x \in \mathcal{F}} \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \mathbb{E}[r(t)]$$

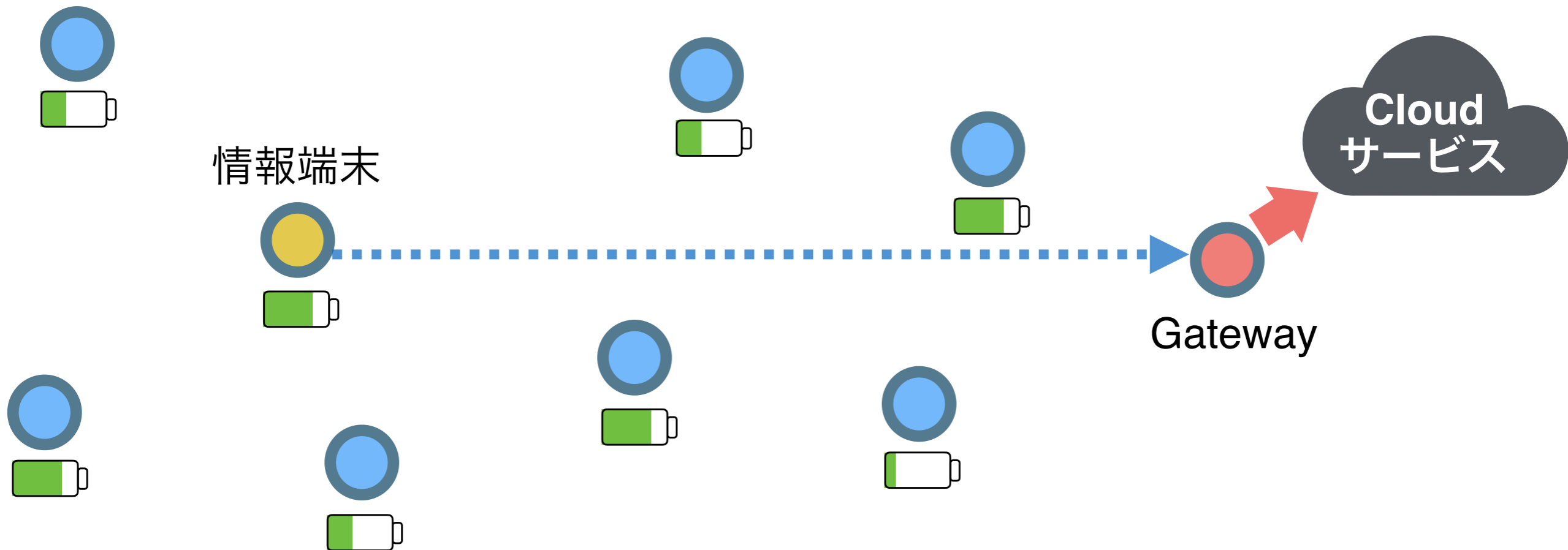
多端末環境での設計

- ・ 多数の端末がいる場合にはどう設計すべきか？



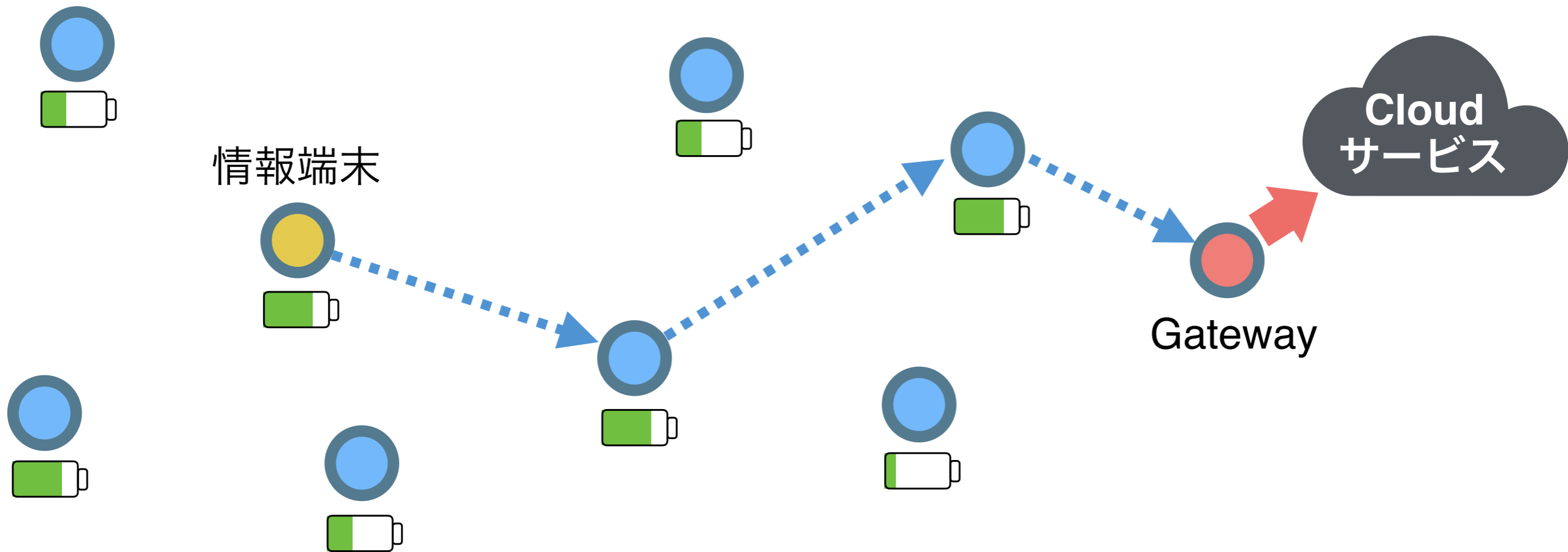
多端末環境での設計

- ・ 多数の端末がいる場合にはどう設計すべきか？



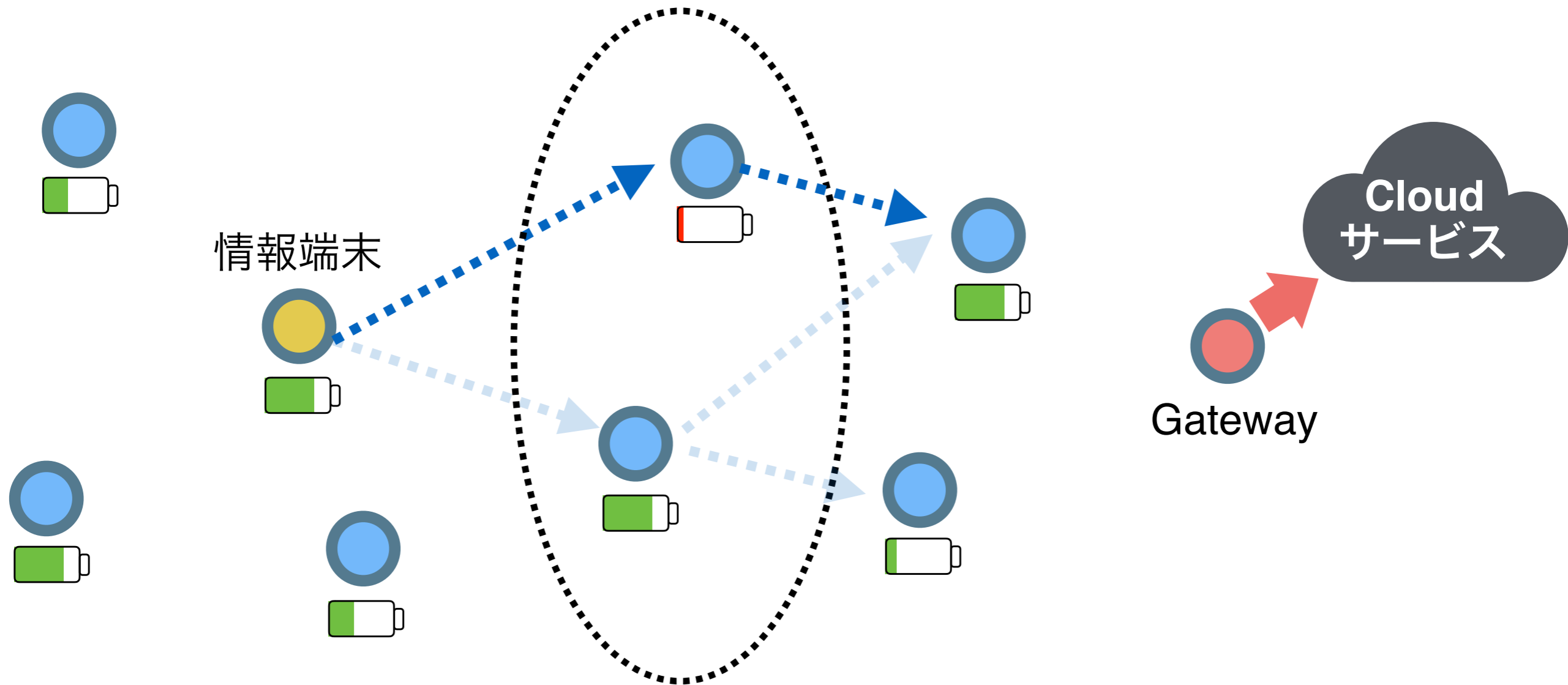
多端末環境での設計

- 多数の端末がいる場合にはどう設計すべきか？



多端末環境での設計

- 多数の端末がいる場合にはどう設計すべきか？

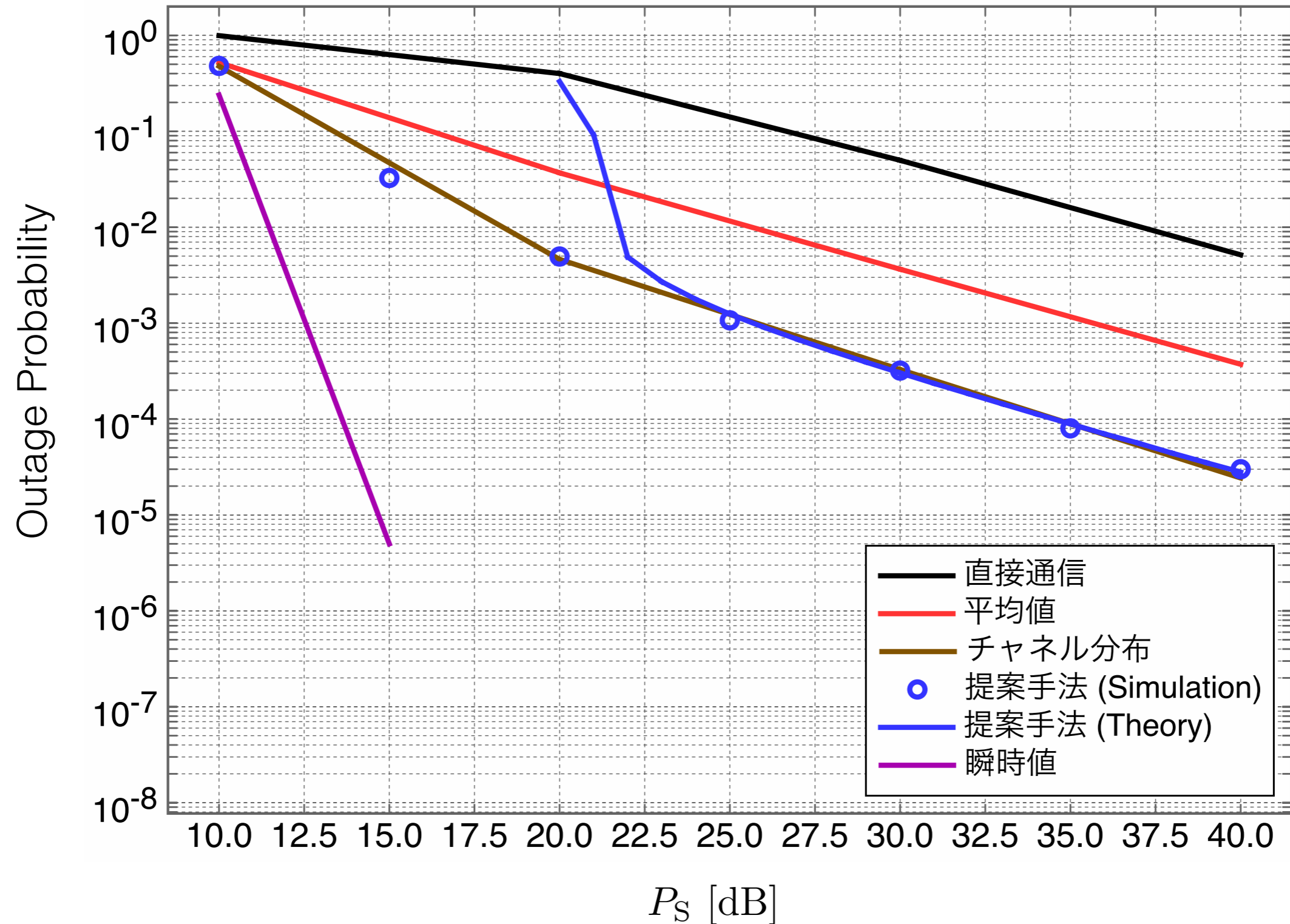


どっちを、どうやって選ぶべき？

中継通信の設計

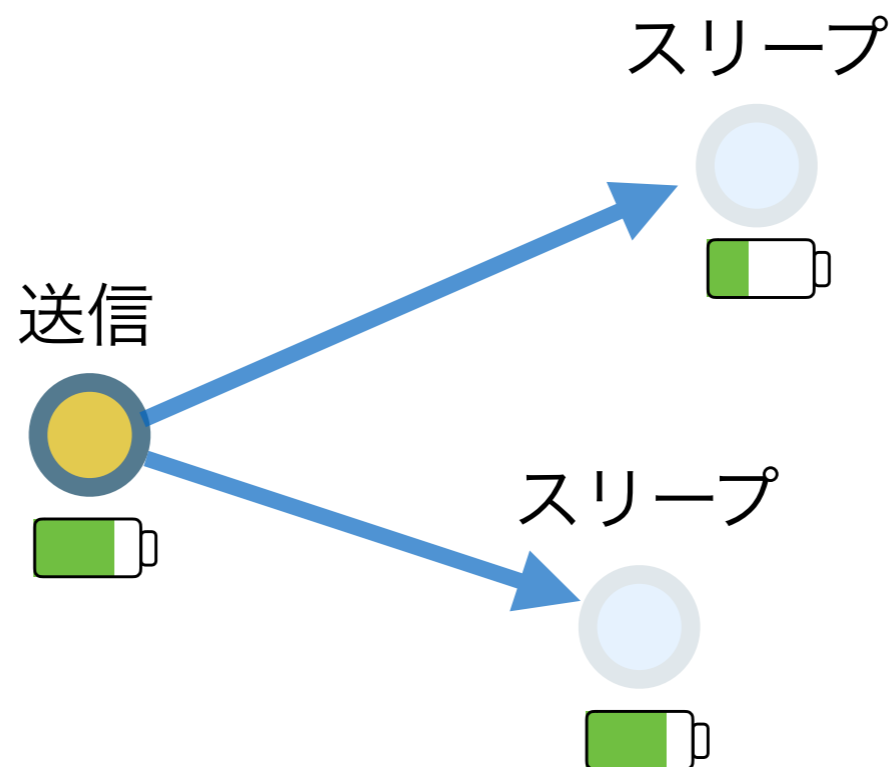
- ・ 残電力量と通信路の状態にあわせてタイマーを設定し、よりよい状態の端末ほど早く起動し、中継可能である旨を報知する [Kawabata et. al., IoT'17]

アウトージ確率

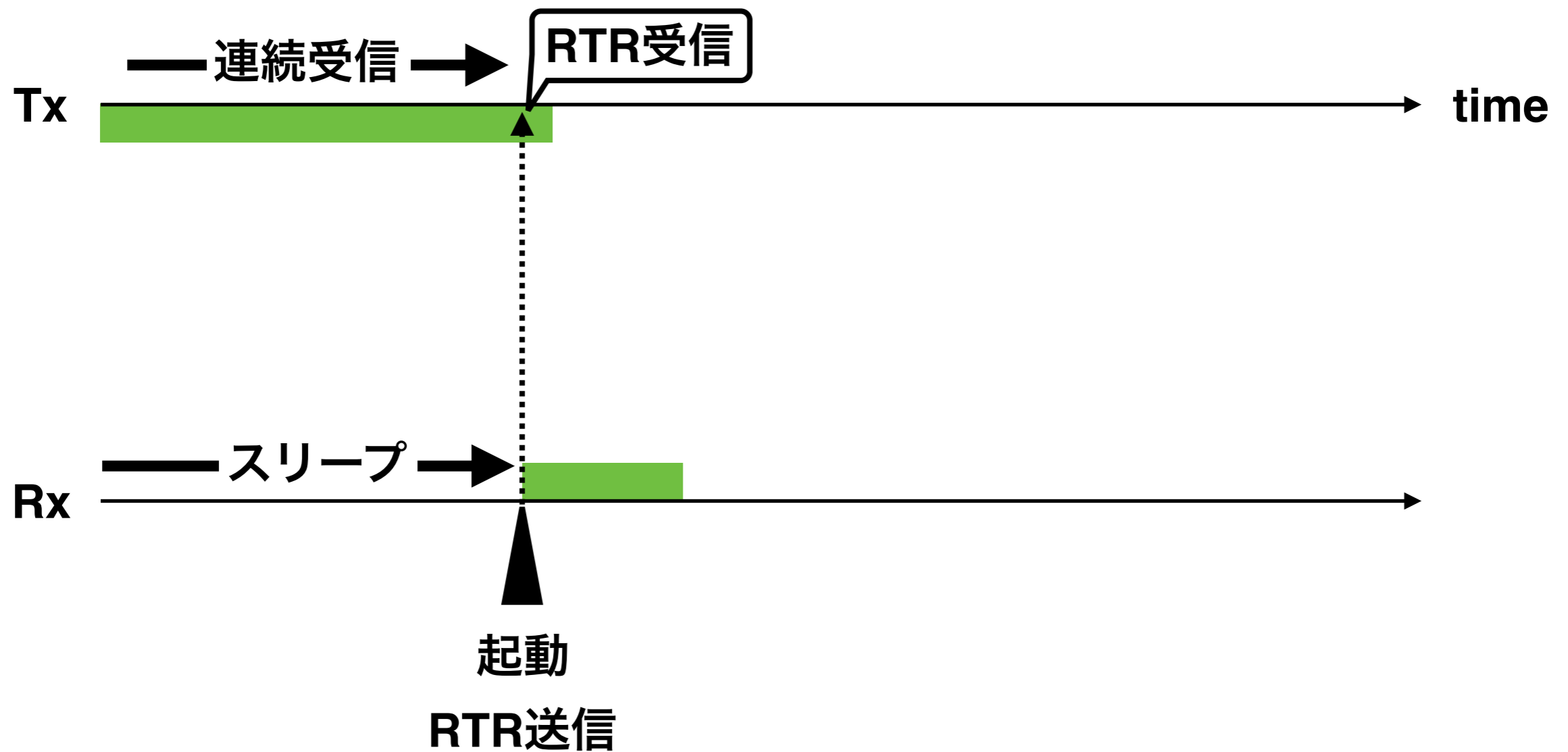


実際の設計

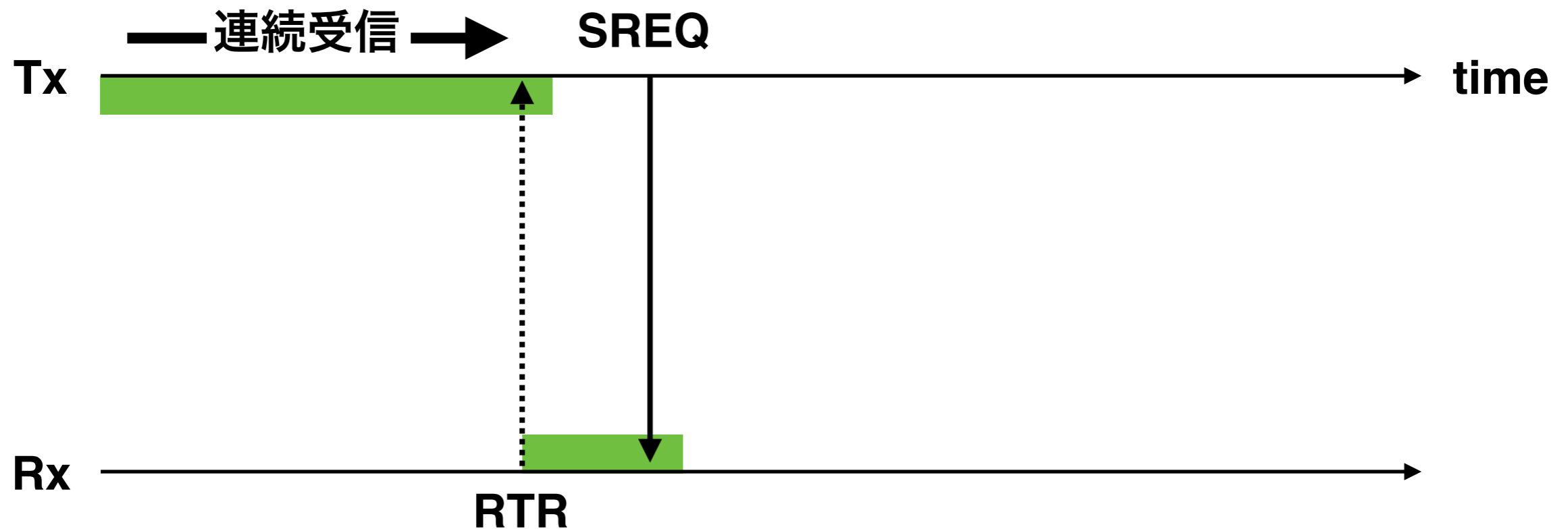
- ・ 瞬時の通信路が良好で，電池残量がよい端末が中継をすべき
- ・ しかし実際の端末は消費電力を抑圧するために，ほぼ常時スリープしており，好きなタイミングでやりとりができない



受信機駆動型MACの動作



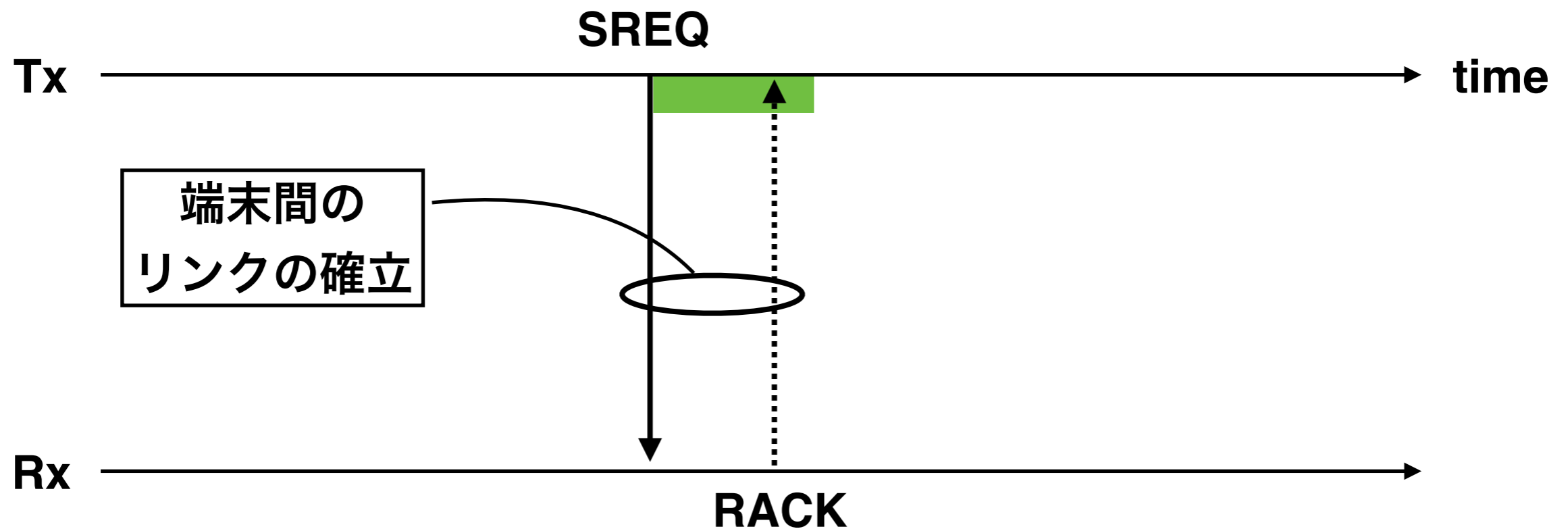
受信機駆動型MACの動作



SREQ (Send REQuest) : 送信要求

受信機駆動型MACの動作

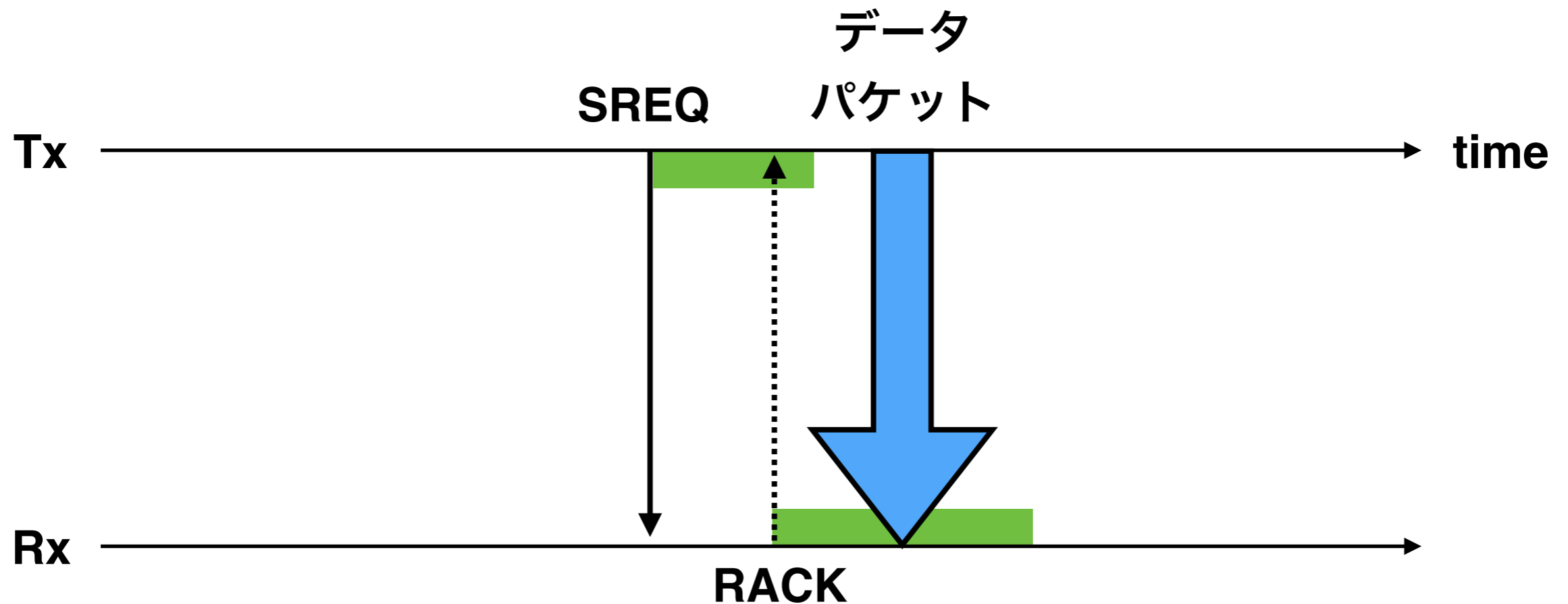
* TxはRTRを受信するとRxに対し， SREQを送信



RACK (Acknowledgement for SREQ) : 送信要求肯定応答

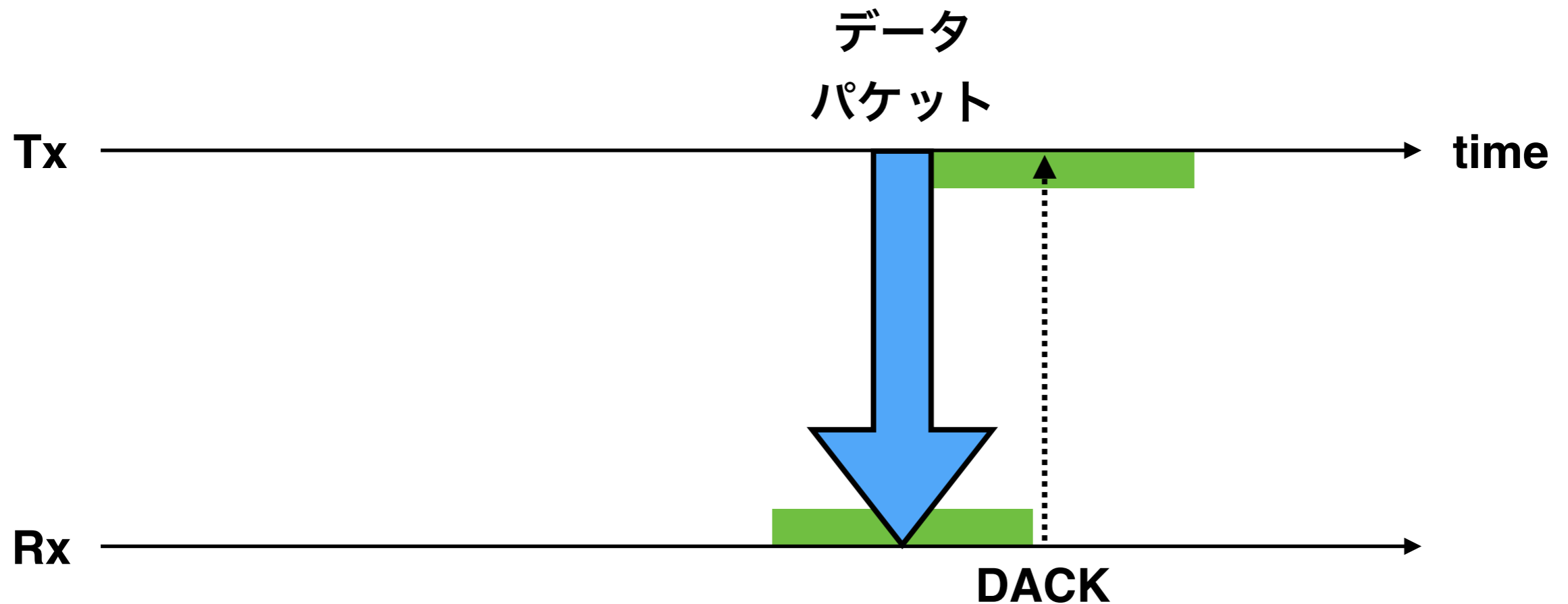
受信機駆動型MACの動作

* 端末間のリンクの確立後, TxはデータパケットをRxへ送信



受信機駆動型MACの動作

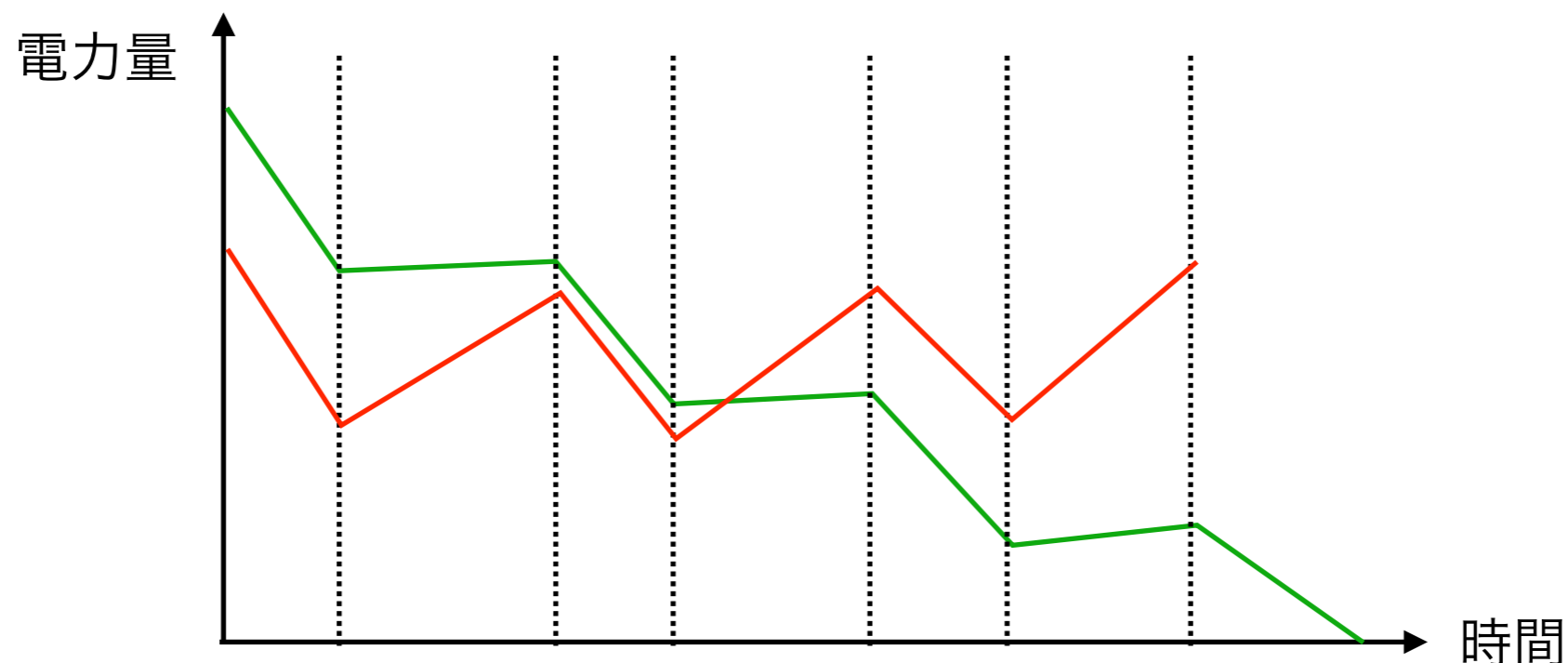
* Rxがデータパケットを正しく受信するとDACKを送信し，通信を終了



DACK (Data ACKnowledgement) : データ肯定応答

回収電力量予測

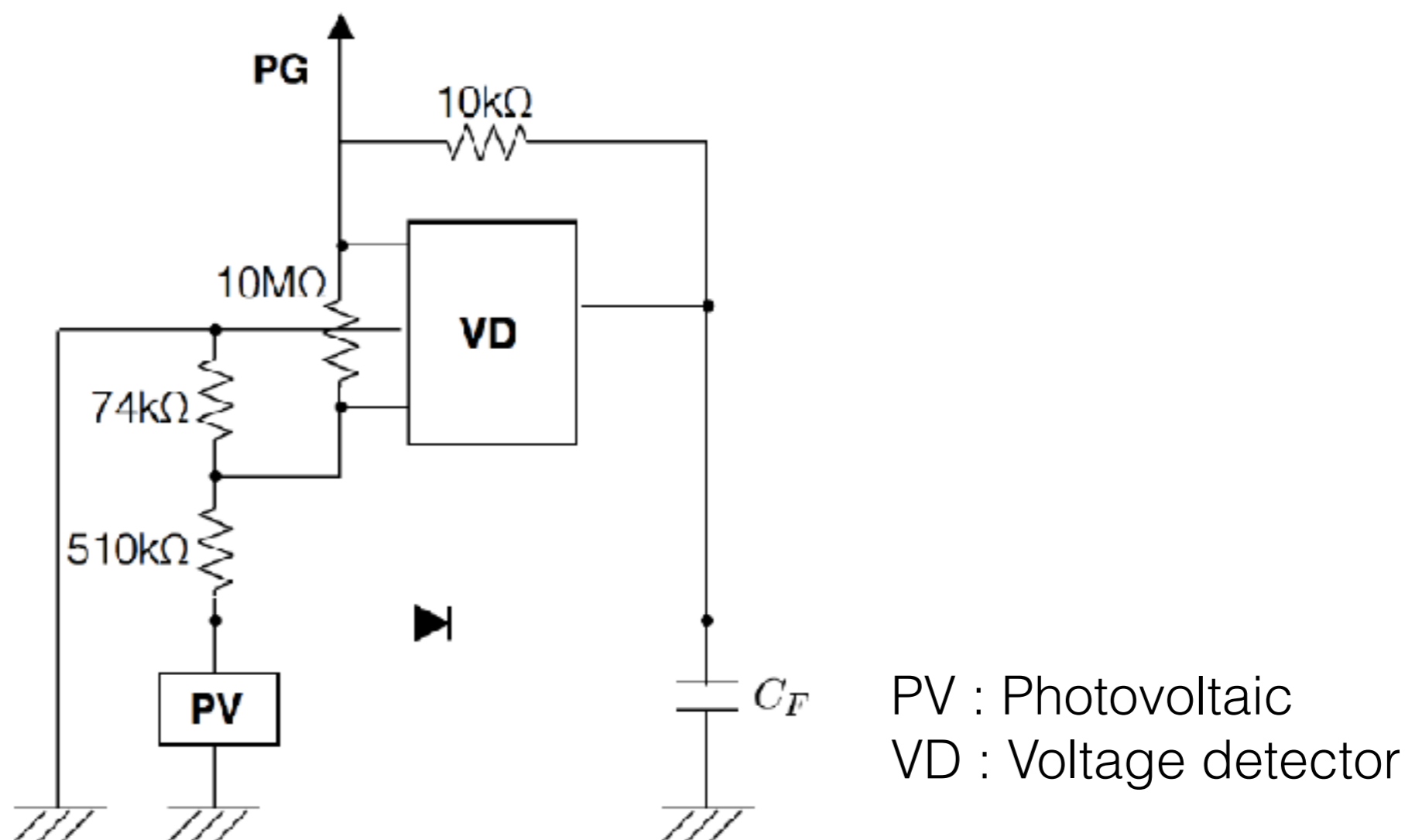
- ・ RTR送信間隔を制御することで状況がよい端末を発見させやすくする
- ・ 現時点で端末に十分な電力量があっても、エネルギーハーベスタから十分な電力が回収できていない可能性がある



回収電力量予測

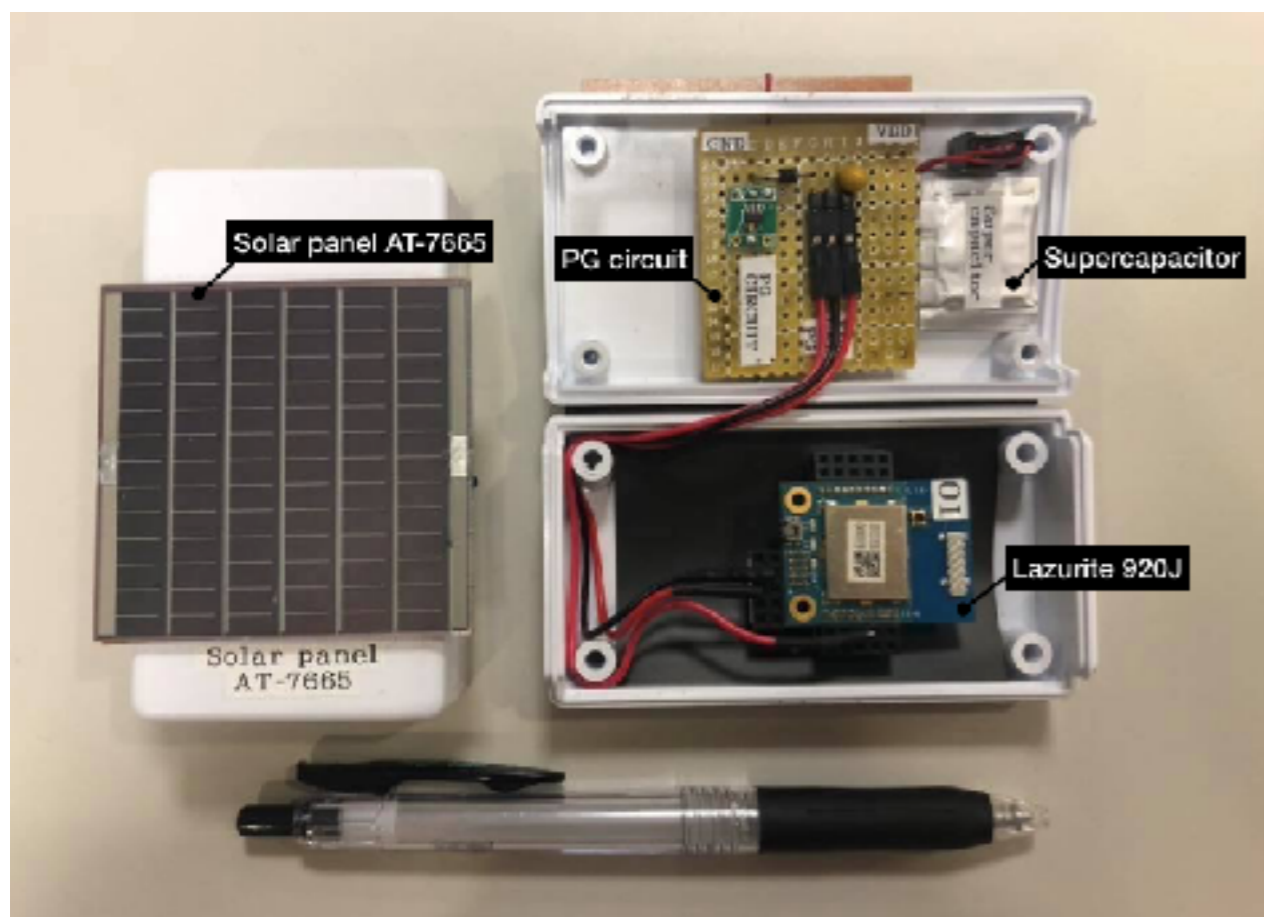
- 各端末は自身のPG信号と周囲の通信可能端末台数の情報から分散的に間欠間隔を制御

*PVからの出力電圧，キャパシタの電圧の**閾値判定**を行い，
閾値以上であればPG信号を出力



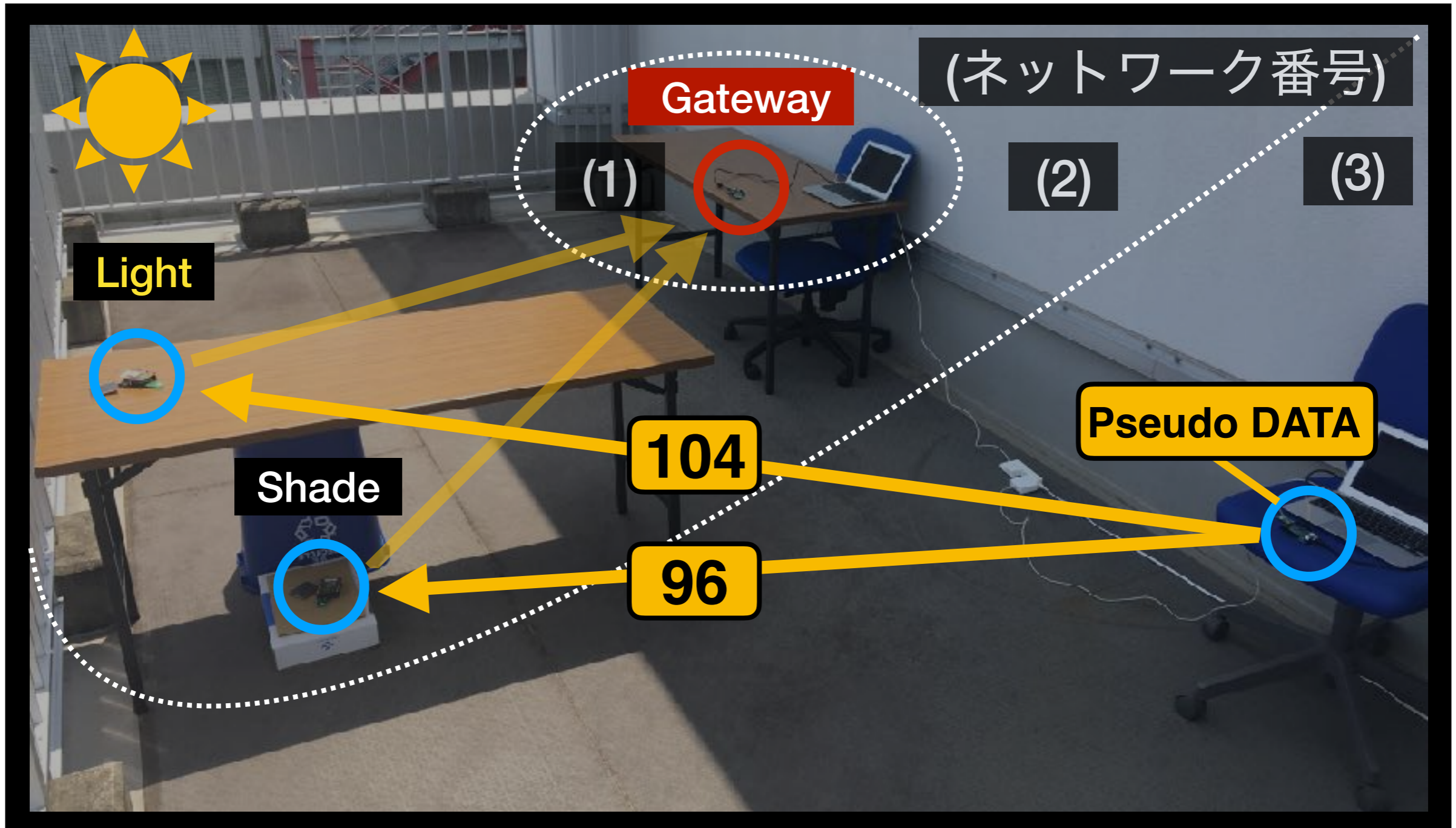
実装

- ❖ 市販品のみで実装
- ❖ エナジーハーベスティング電源は太陽光 (Solar panel AT-7665, Sanyo製)
- ❖ 無線機能を具備したマイクロコンピュータ (Lazurite 920J, LAPISセミコンダクタ製)
- ❖ 回収電力の多寡を判断する Power-Good 回路を実装
- ❖ ENRI-MACはソフトウェア上にて実装



使用周波数帯	920 [MHz]
送信電力	1.0 [mW]
周波数偏差	±20 [ppm]以下
変調方式	2値GFSK
アンテナ利得	-1.8 [dBm]
アンテナ受信感度	-100 [dBm]
データレート	100 [kbps]
無線規格	ARIB STD-T-108準拠 IEEE802.15.4g

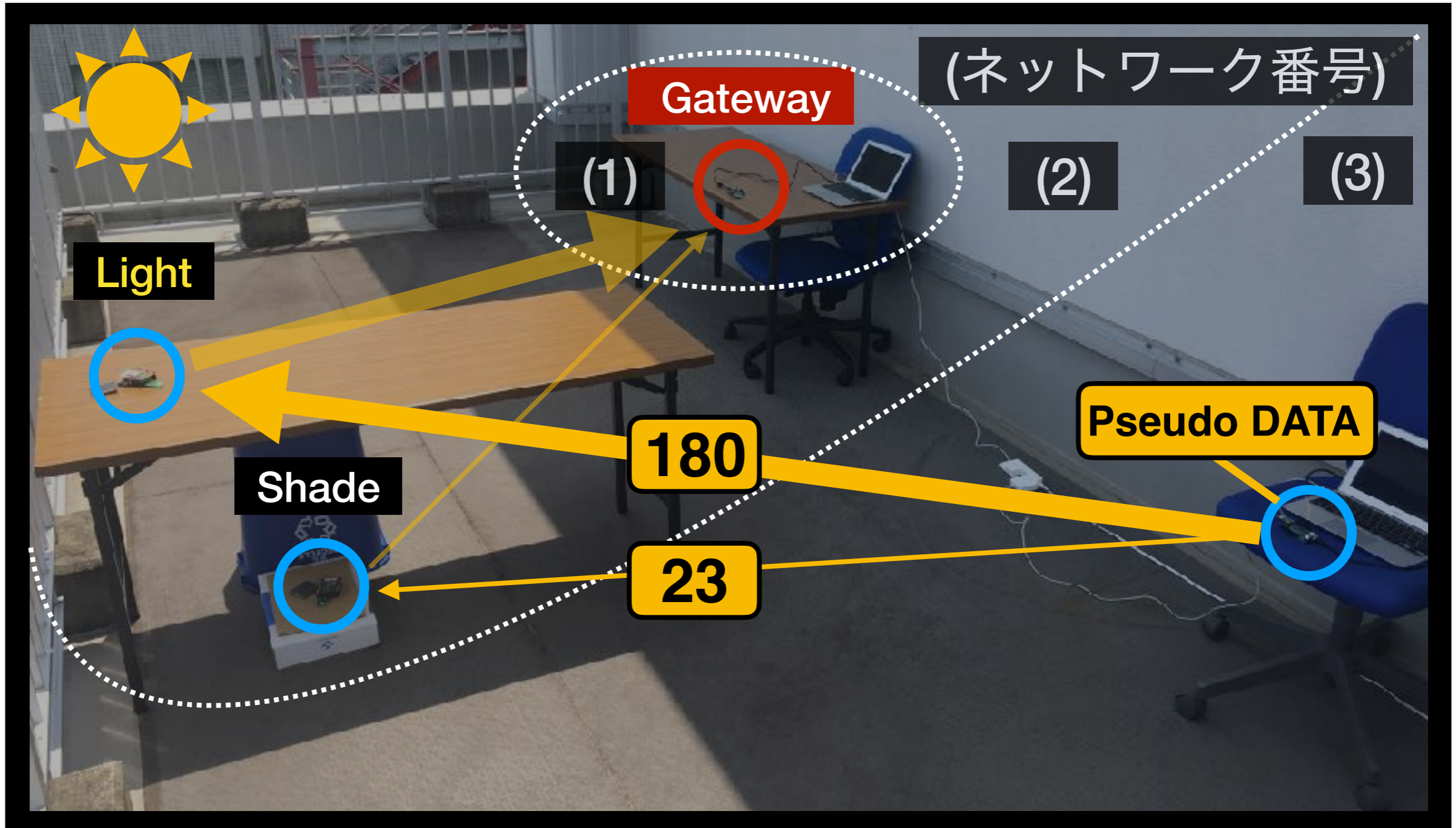
実験による数値例



Packet Loss Rate = 0.01

動作間隔制御なし

実験による数値例

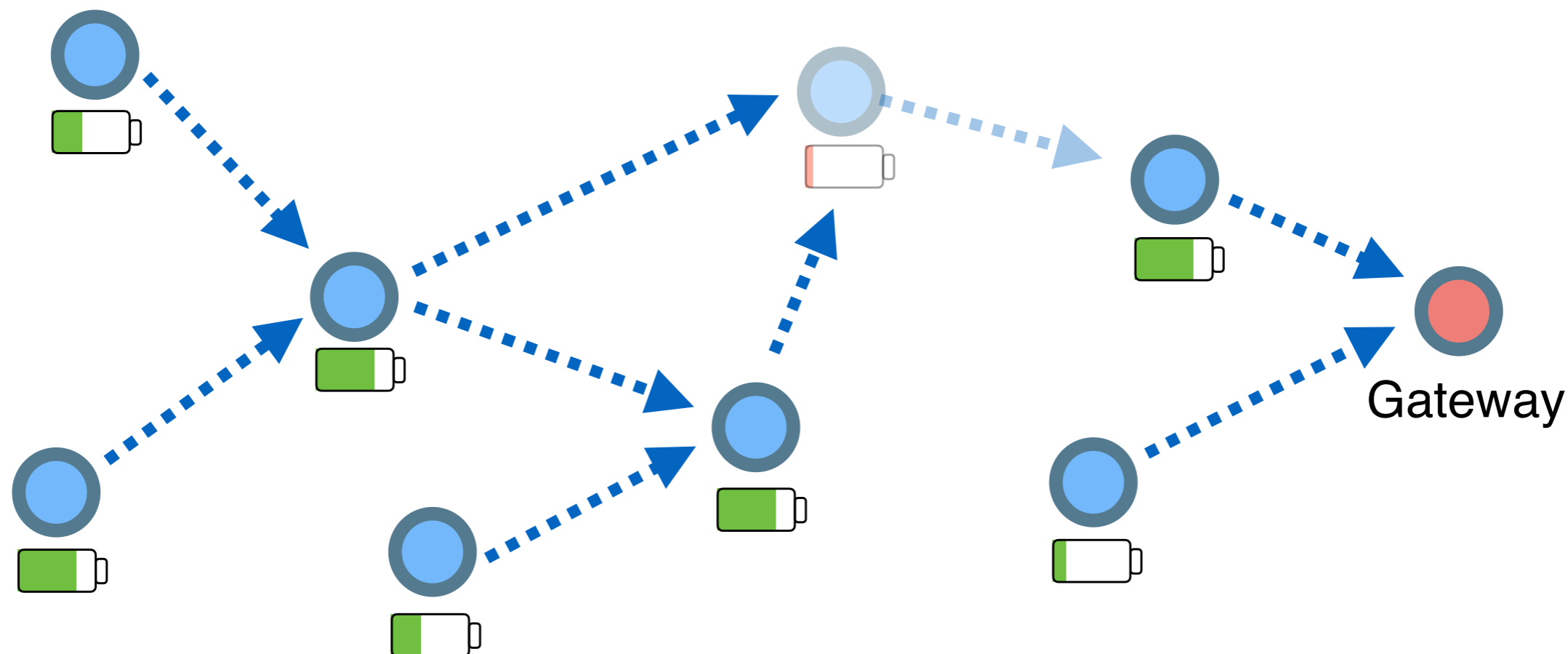


Packet Loss Rate = 0

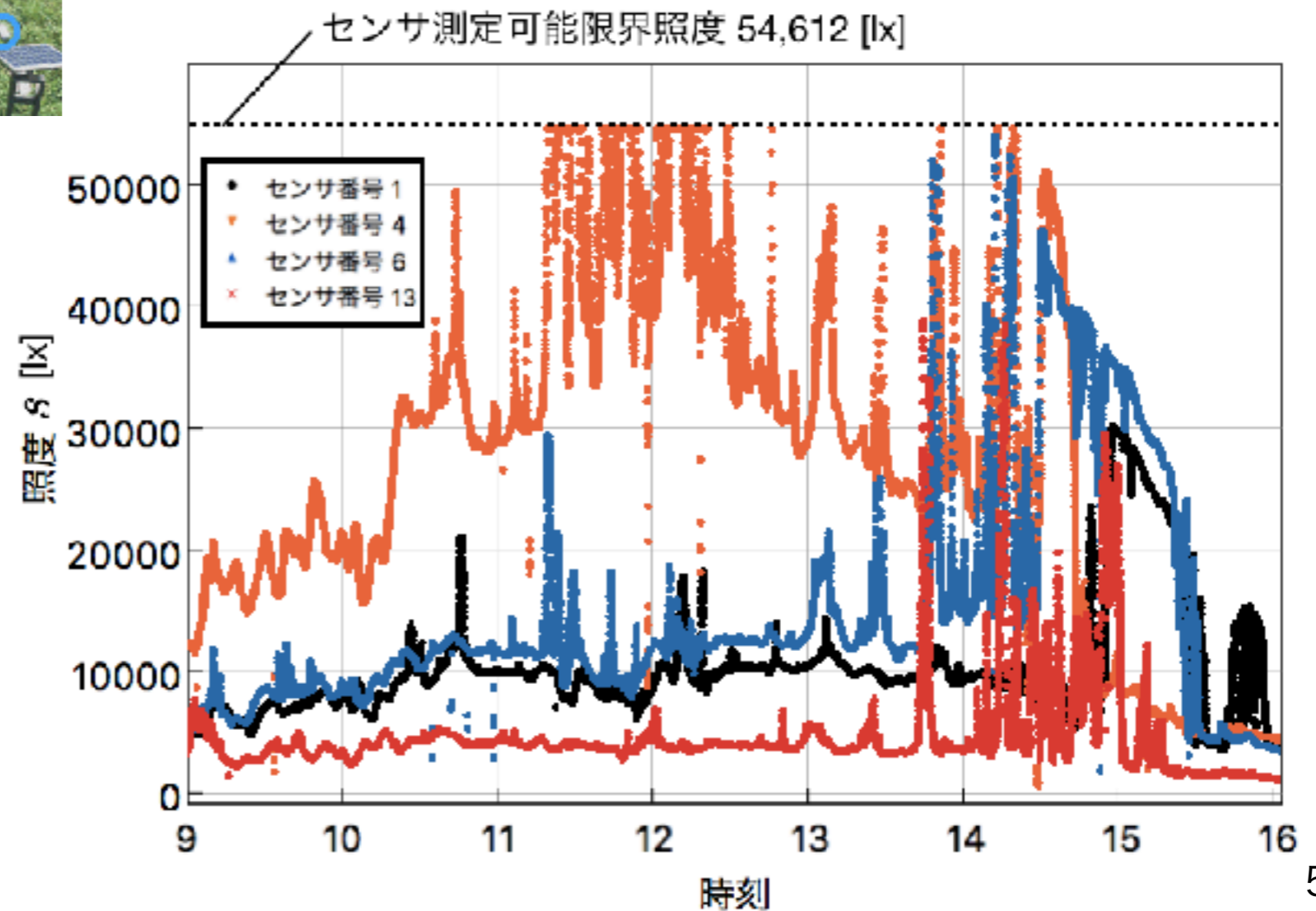
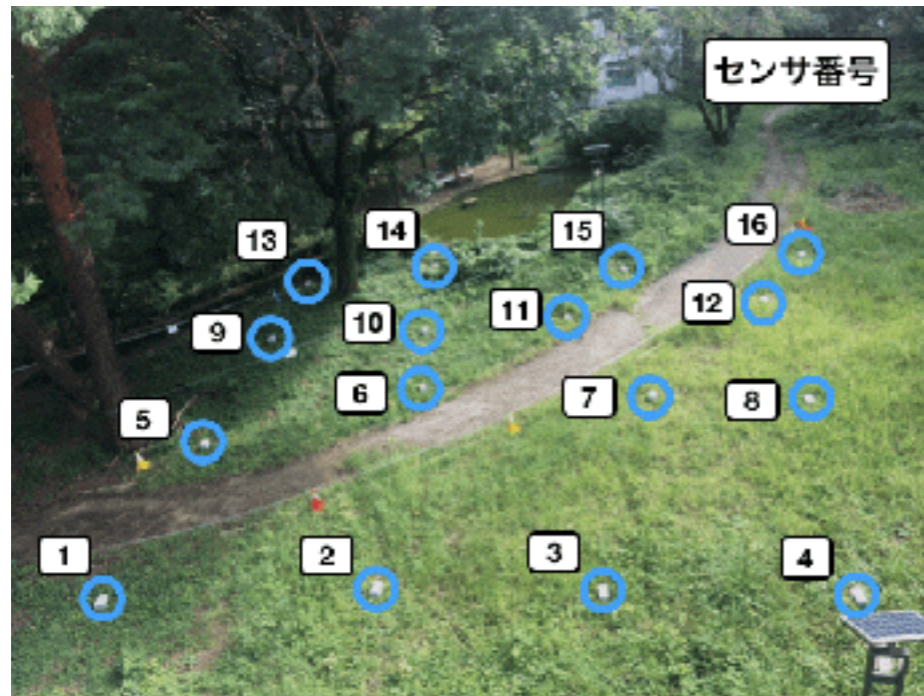
動作間隔制御あり

残された課題

- ・ 電源が確率的であり，通信路もまた確率的であることからある確率で孤立集団が形成される．安定性をどう解析するか？
- ・ 端末間での事象が独立でなく解析困難．端末の独立な消失に対しては解析あり [Takabe&Wadayama, arXiv'18]



情報源・通信路・電源の多次元相関



おわりに

- ・ 環境発電を用いた通信とは，確率的な電源の制約を加えた新しい最適化問題
- ・ いくつかの重要な結果は出ているものの実装の設計に影響を与えるほどの解は得られていない
- ・ 現時点では理論と実際に乖離が存在すると言わざるをえず，それを埋めるような道具がさらに必要
 - ・ 有限長解析，有限容量解析，非線形解析など
- ・ この問題に取り組んでいる研究者が日本では少ないので是非参入してほしい（= 共同研究しましょう）