

バッテリーレス・バッテリー混載型 異常診断システム

東京理科大学 先進工学部 物理工学科

教授 中嶋 宇史

2024年11月7日

研究の背景: Ambient IoT

The future of IoT is 100% batteryless!

<https://www.onio.com/article/ambient-energy-world-of-iot.html>



【センサーへの電力供給】

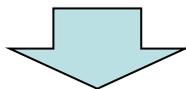
1兆個のセンサ社会

電池寿命が10年としても、毎日2億7400万個もの電池交換が必要

【バッテリー】

・コバルト鉱床のほとんどはコンゴ民主共和国に集中。コバルト鉱山の採掘に従事する子どもたちは、1日1~3ドルという過酷な労働。

・寿命が尽きたバッテリーの多くは通常、海や埋立地に廃棄されている。



代替電源ソリューションとしてのエネルギーハーベスティング(EH)

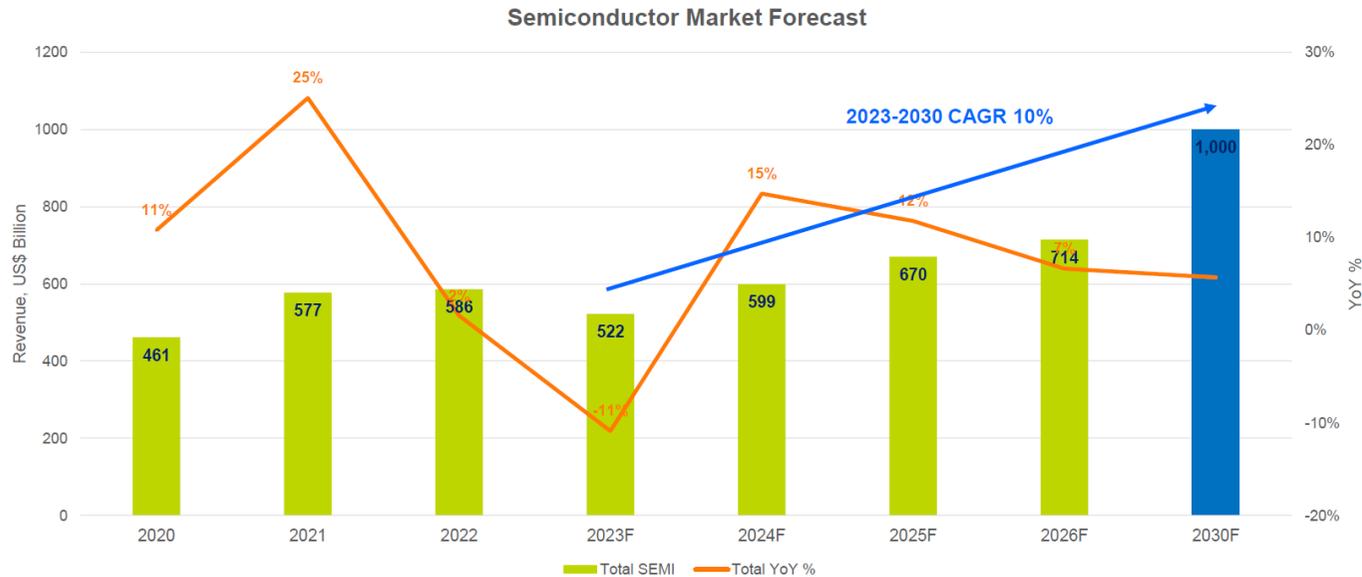
・メンテナンスやバッテリー交換に関連するコストの低減

・年間生産されるバッテリーの減少

超低消費電力の機器が、環境エネルギーハーベスティングに切り替わる未来!

製造ラインを止めない異常診断・異常予測 の必要性

半導体市場は2030年に1兆\$へ

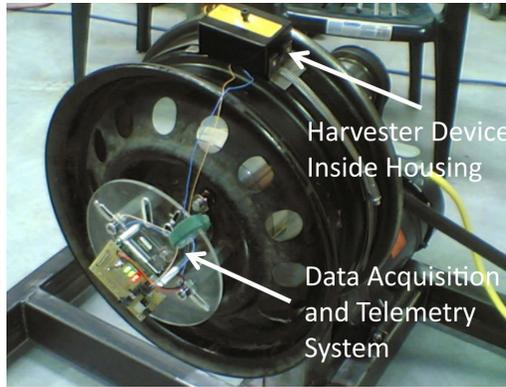


Source: WSTS, Gartner, SEMI Forecast, 4Q23

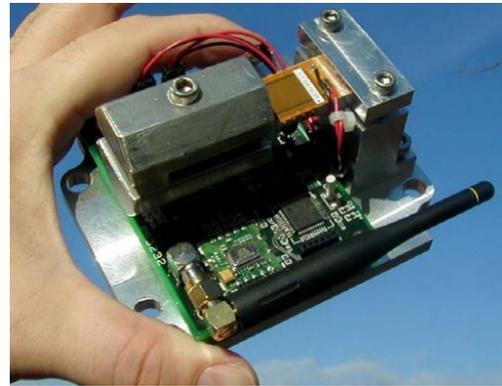
既存の製造装置に後付けで診断できるデバイスが望ましい

出所: SEMIジャパン

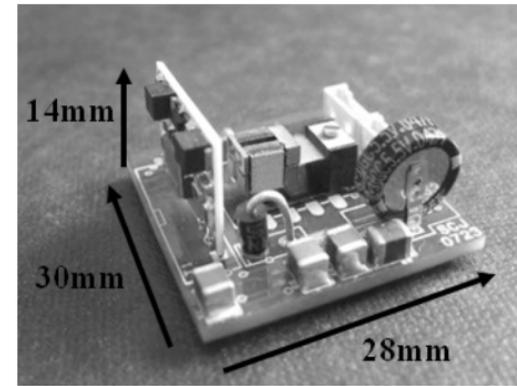
振動発電を用いた無線送信の先行例



[1]



[2]

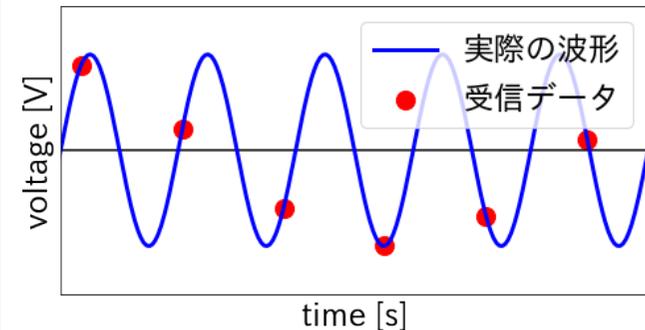


[3]

振動発電によりバッテリーレス駆動を行った先行事例

送信データの解析まで行っている例は少ない

- データ点数の制限
発電量が微小なため、データの常時伝送が困難
- サンプリング周波数の制限
低消費電力デバイスの性能上
高サンプリングレートでの送信が難しい

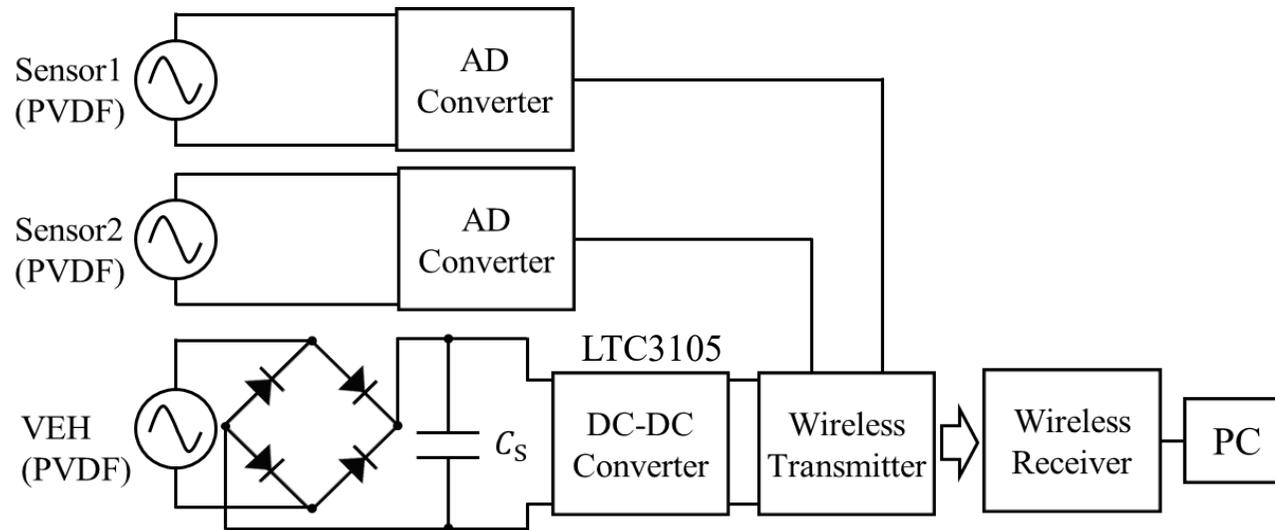


解析面での工夫を行うことでより実用的なセンサーデバイスが実現できる可能性

[1] Shad Roundy., *Smart Mater. Struct.*, **23** (2014), 105004. [2] S.W. Arms, et al., *Proc. SPIE*, **5763** (2005), 267.

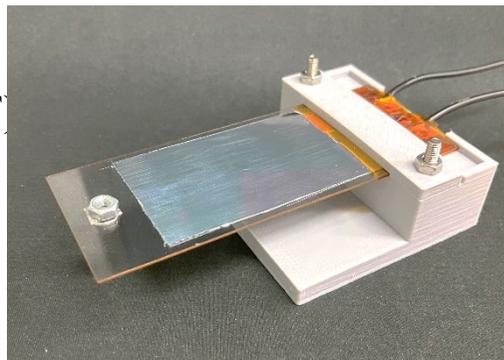
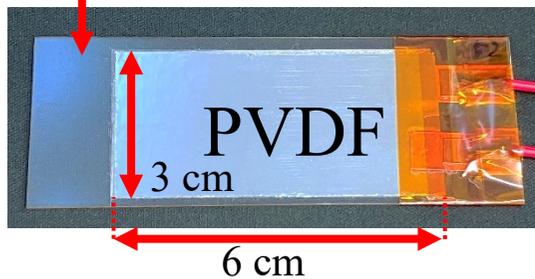
[3] R Torah, et al., *Meas Sci Technol*, **16** (2007), 1810.

エネルギーハーベスティングと無線通信



PVDFを用いたVEHを作製

ポリフッ化ビニリデン(PVDF)



PVDF-VEH



Wireless Transmitter
(TWELITE DIP)

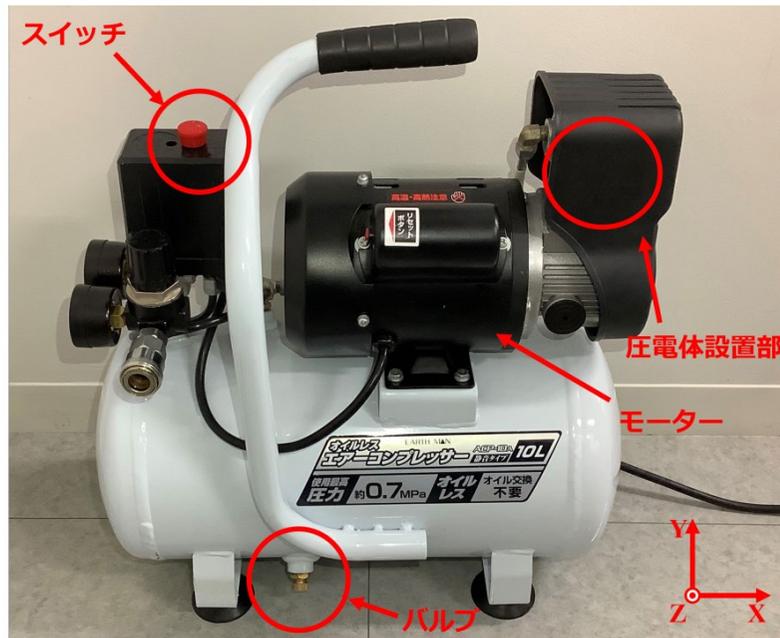


Wireless Receiver
(TWELITE MONOSTICK)

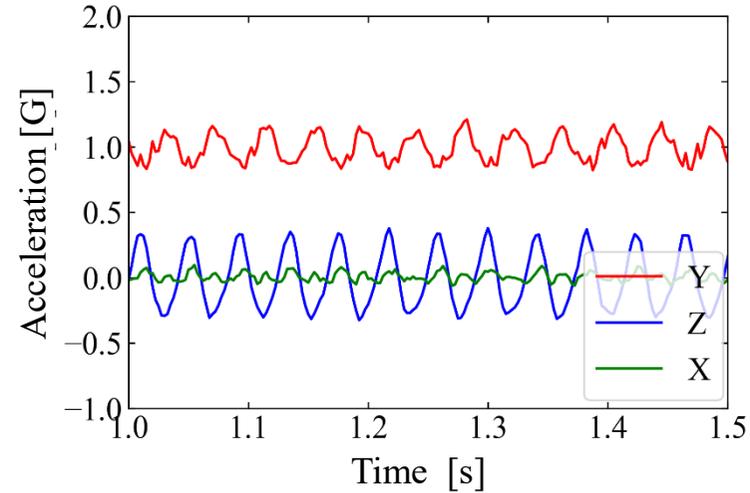
PVDFによる振動発電

↓
充電後、無線1点送信

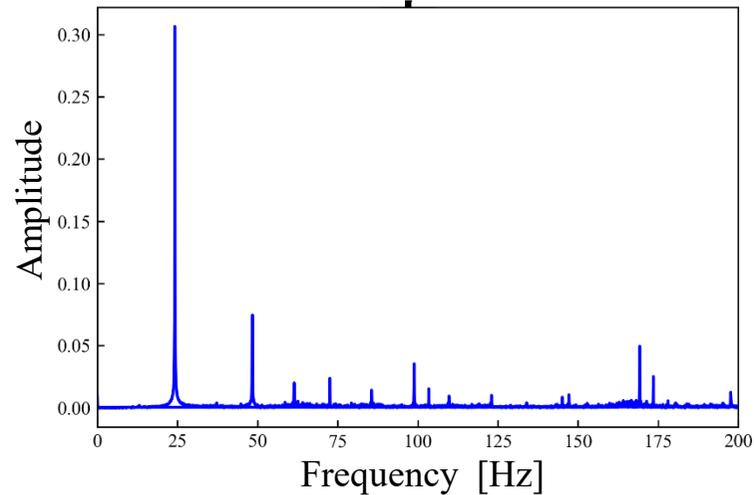
監視対象のエアークンプレッサー



オイルレスエアークンプレッサー



圧電体設置部の加速

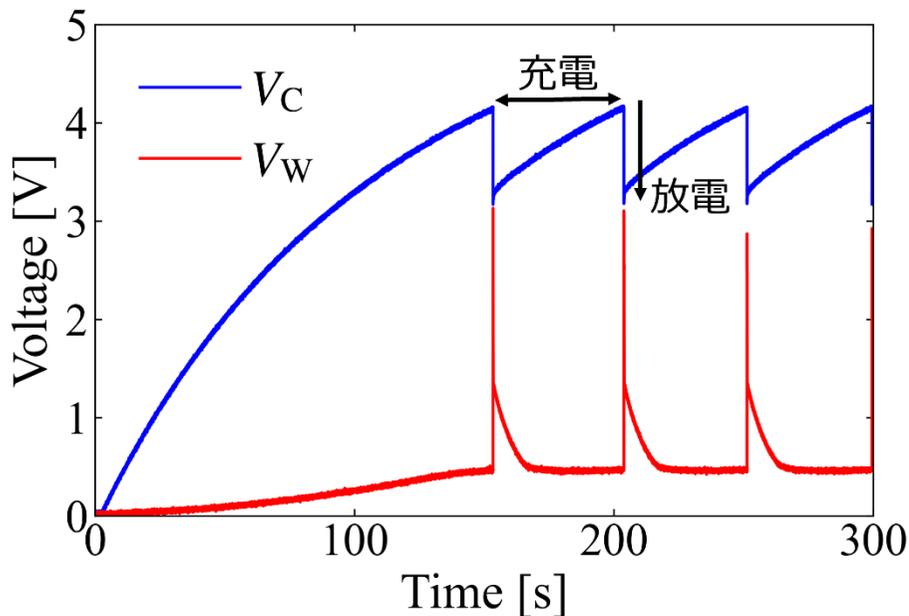


Z軸フーリエ変換結果

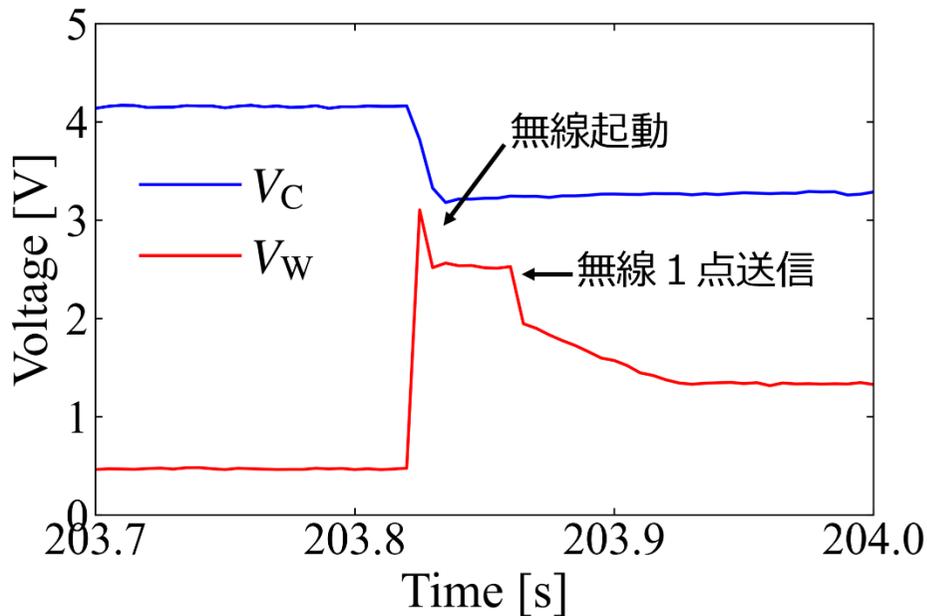
充放電特性とセンサーデータ

システム駆動時の充放電電圧
(V_C : キャパシタ充電電圧
 V_W : 無線への入力電圧)

キャパシタ容量 $C=2200 \mu\text{F}$



放電時の詳細挙動



10 s~80 s間隔で1点の
センサー電圧値を取得

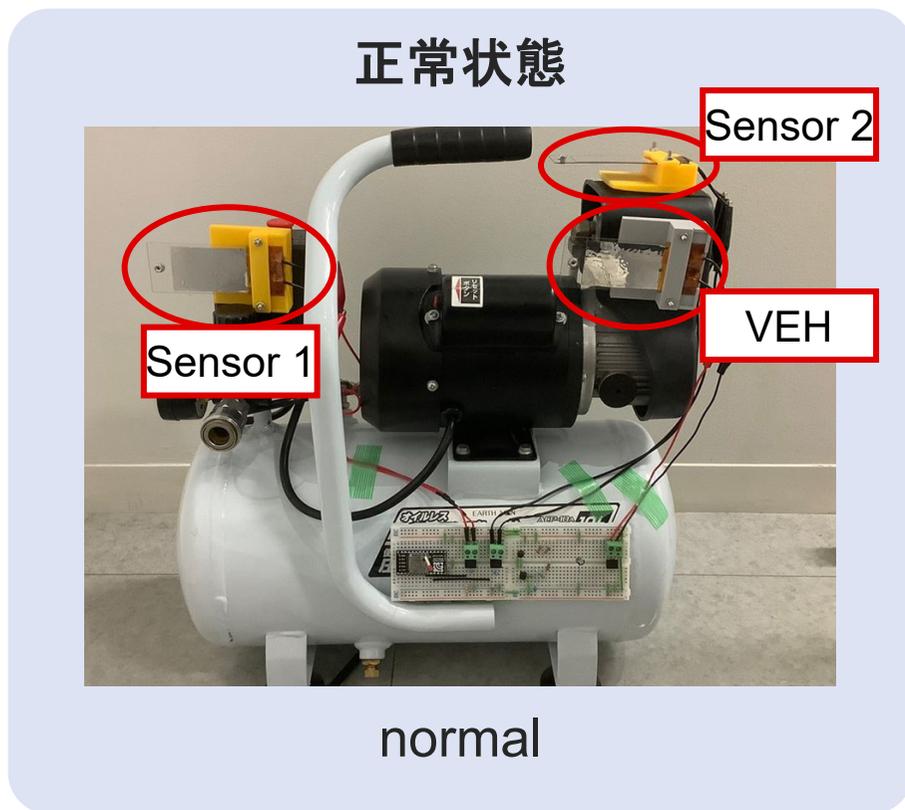


特徴量

- Sensor1電圧値
- Sensor2電圧値
- データ送信間隔

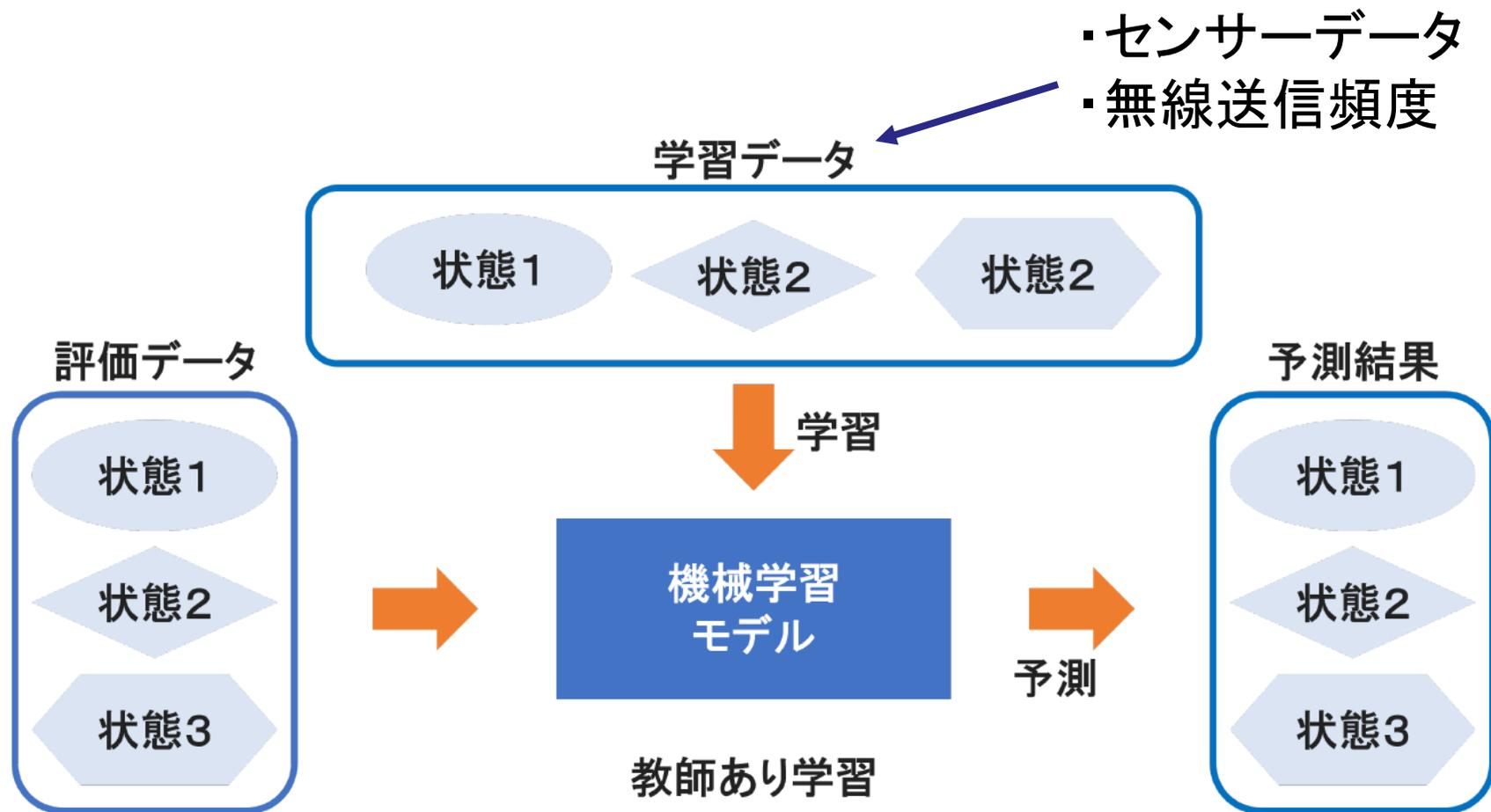
コンプレッサの異常診断

振動物としてオイルレスエアコンプレッサを対象に測定
圧電体から無線までのシステムを貼り付け



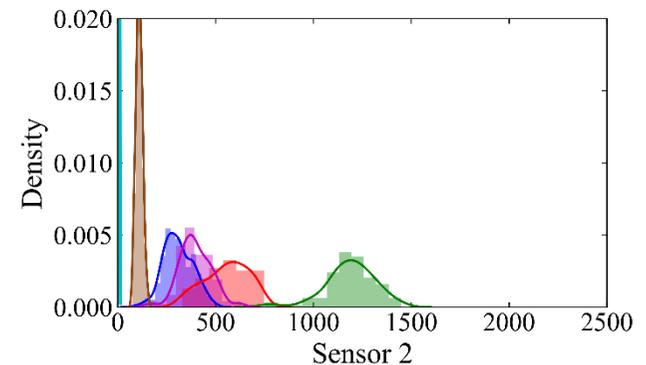
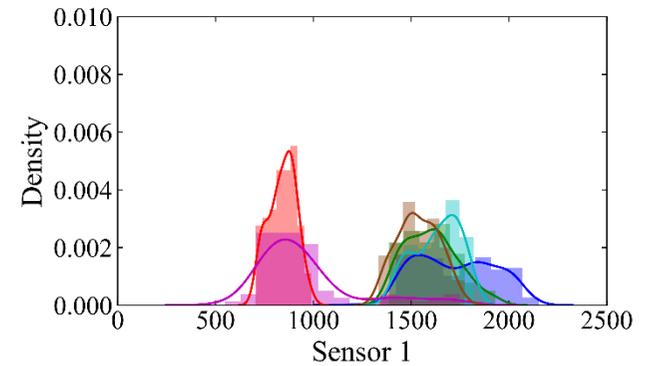
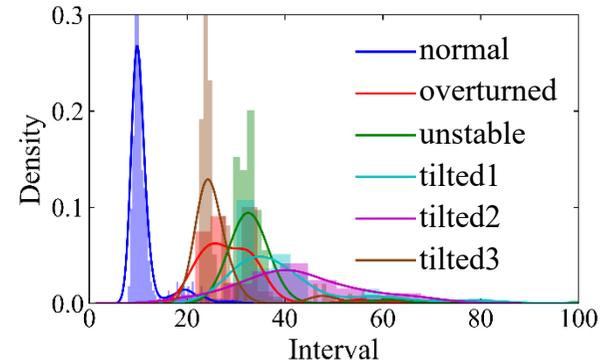
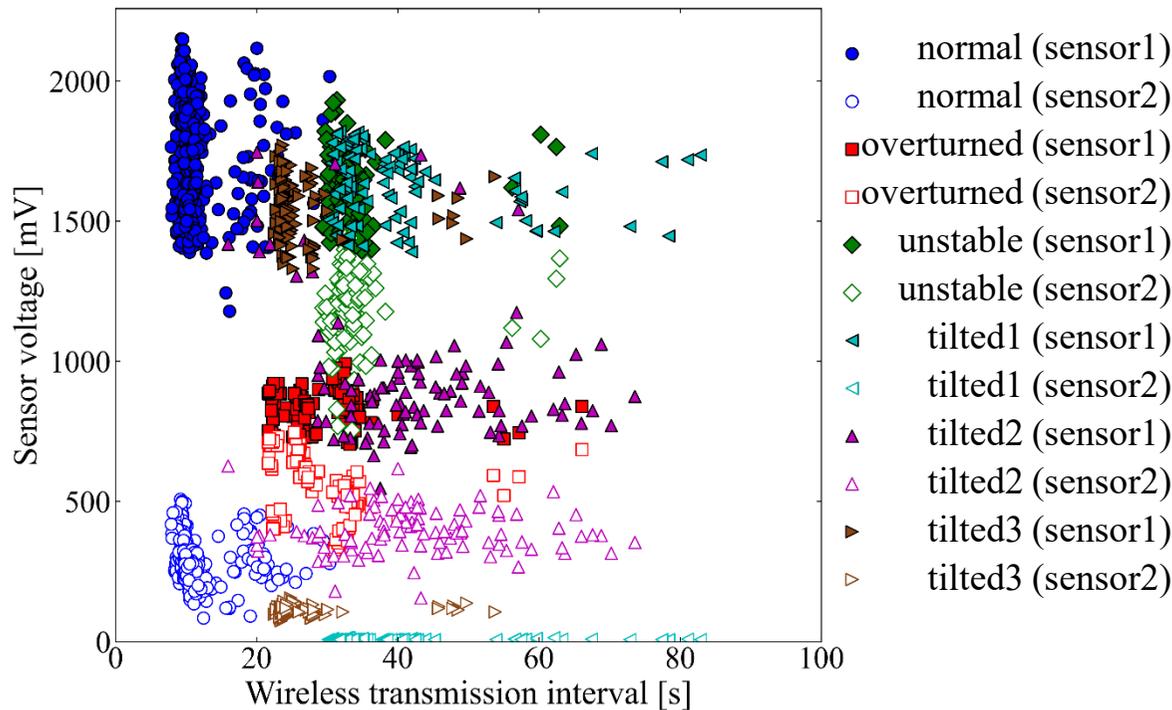
6状態でのデータ収集、解析

機械学習の活用

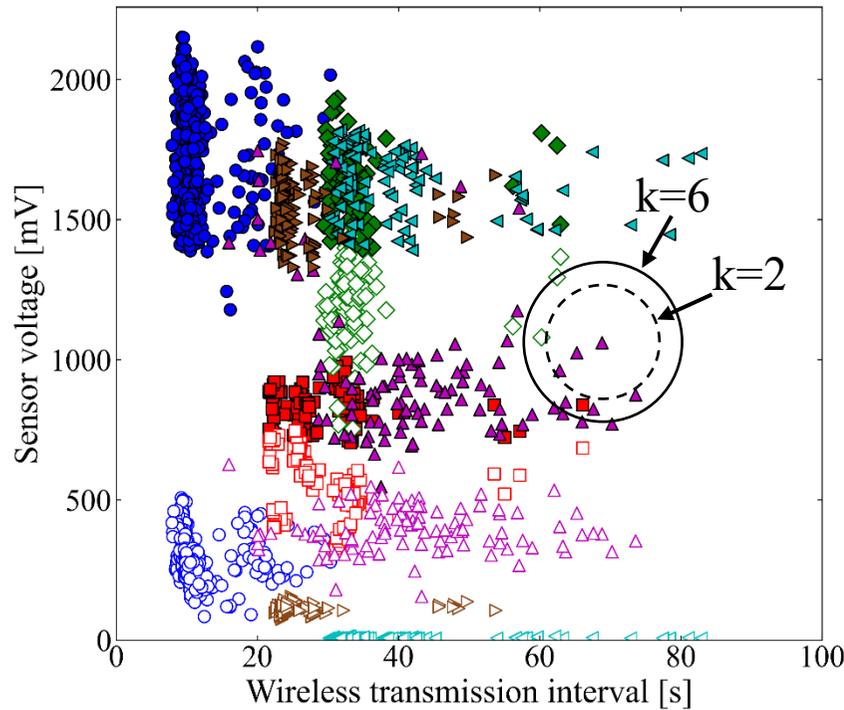


取得データと特徴量の作製

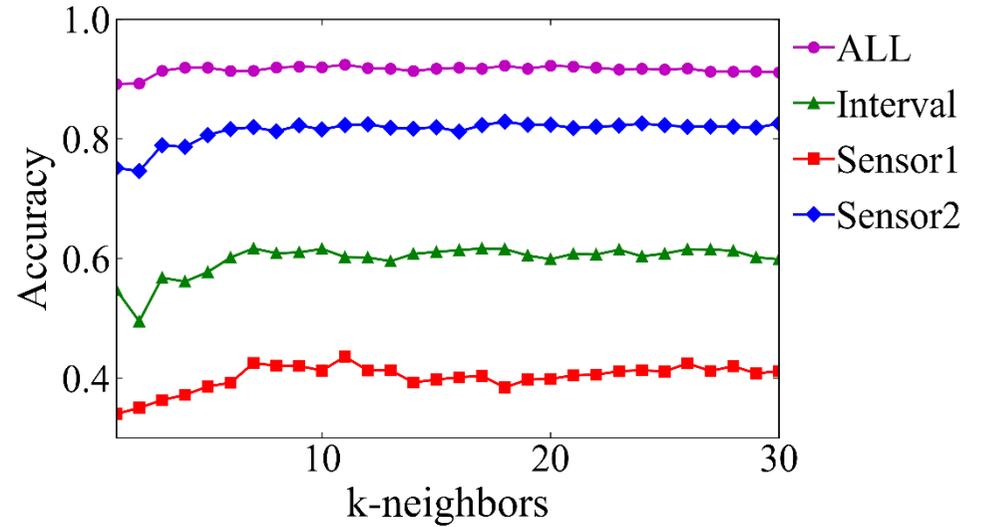
各状態でデータ収集
 特徴量3つ (Sens1/Sens2/interval)
 正常状態: 500点
 異常状態: 各100点 で学習



解析結果:k近傍法による異常診断



- normal (sensor1) ◀ tilted1 (sensor1)
- normal (sensor2) ◀ tilted1 (sensor2)
- overturned (sensor1) ▲ tilted2 (sensor1)
- overturned (sensor2) ▲ tilted2 (sensor2)
- ◆ unstable (sensor1) ▶ tilted3 (sensor1)
- ◇ unstable (sensor2) ▶ tilted3 (sensor2)



k近傍点と精度の関係

最大**91.9%**の精度で判別に成功

データ送信間隔が精度に大きく貢献

異常診断：教師あり学習の精度

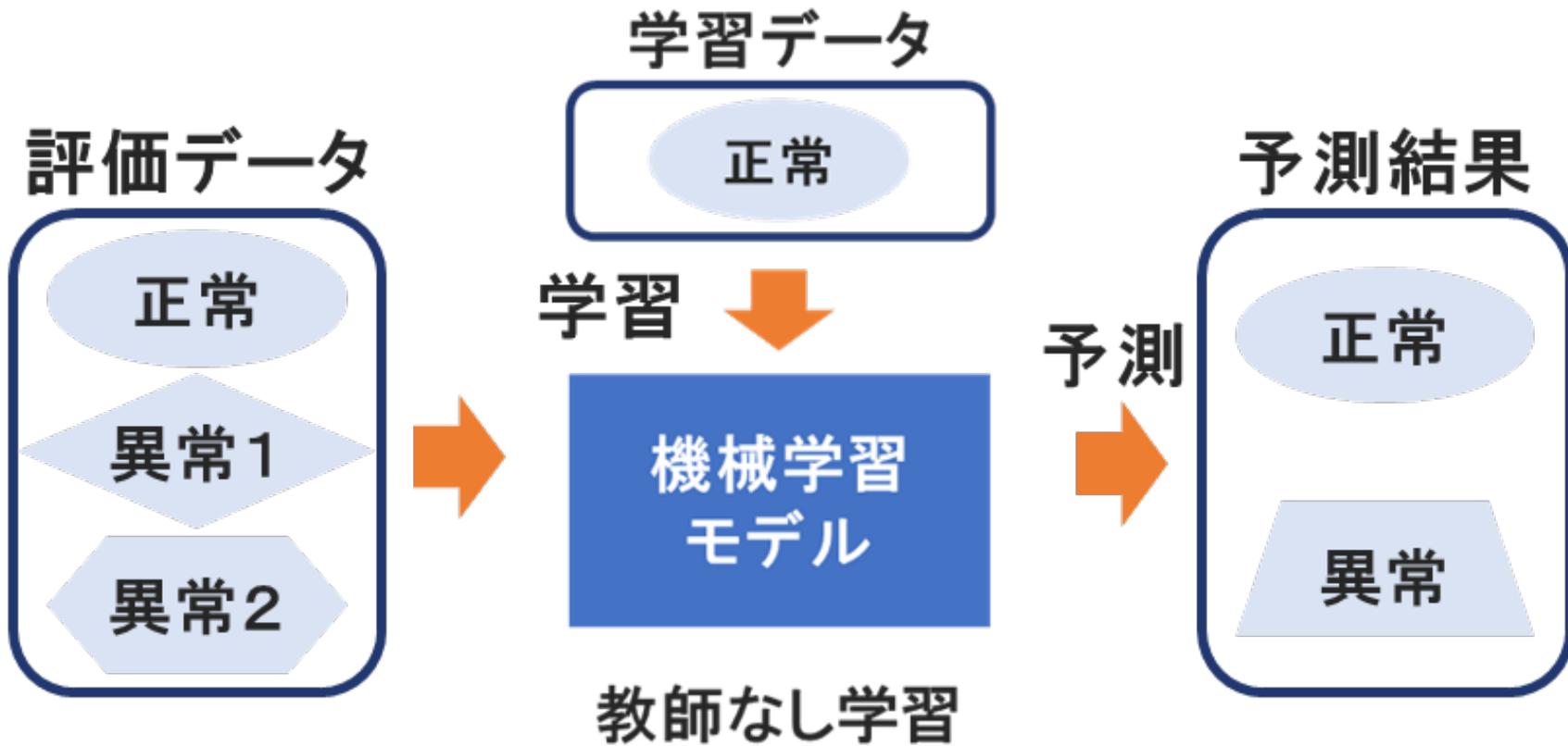
様々な教師あり分類アルゴリズムによる精度比較

- k-nearest neighbor (KNN)
 - ...k近傍点の多数決
- logistic regression
 - ... 線形識別器
- naive bayes
 - ...統計的な識別器
- decision tree
 - ...木構造で表現した識別器
- Support vector machine (SVM)
 - ...非線形識別器
- Light GBM
 - ...木構造のアンサンブル学習

Method	Accuracy
KNN	0.919
logistic regression	0.898
naive bayes	0.942
decision tree	0.940
SVM	0.916
Light GBM	0.948

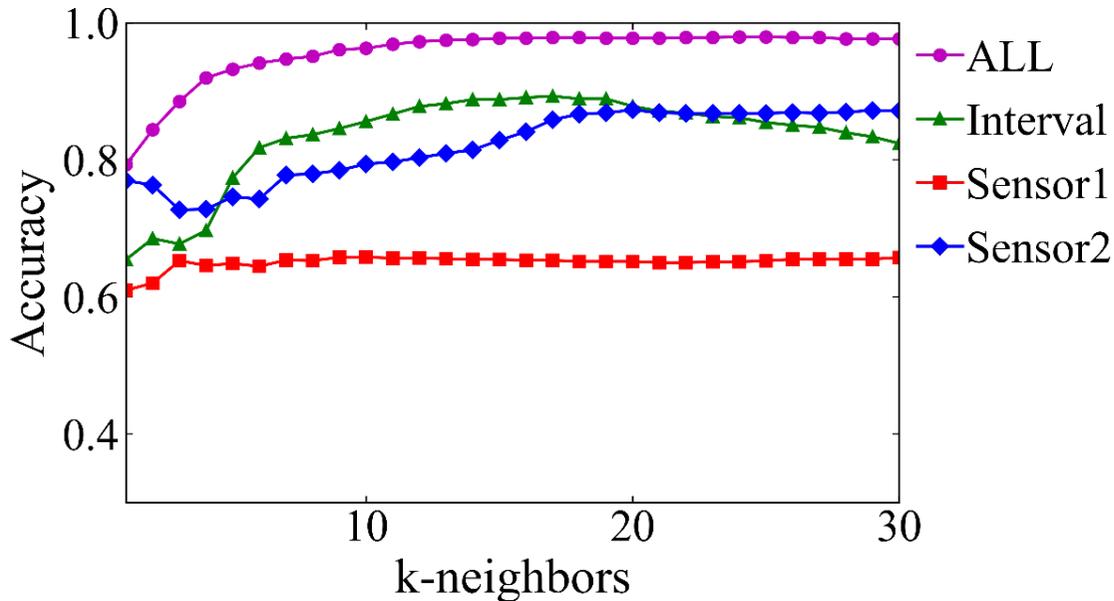
Light GBMで最大**94.8 %**の精度で判別に成功

教師なし学習による異常検知



異常診断：教師あり学習の精度

各種機械学習精度



Method	Accuracy
Local Outlier Factor	0.978
One class SVM	0.890
Isolation forest	0.970

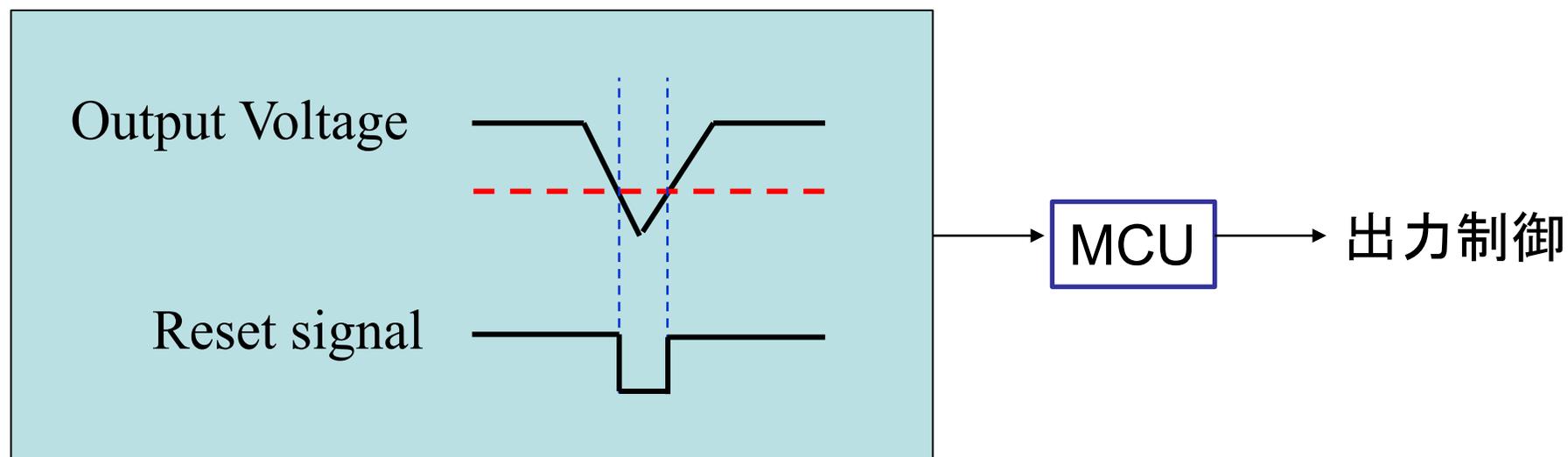
最大**97.8%**で判別に成功

教師あり学習と同様に
データ送信間隔が重要な特徴量に

局所外れ値因子法(LOF)による異常検知精度

事前に異常状態を学習できない場合に有用

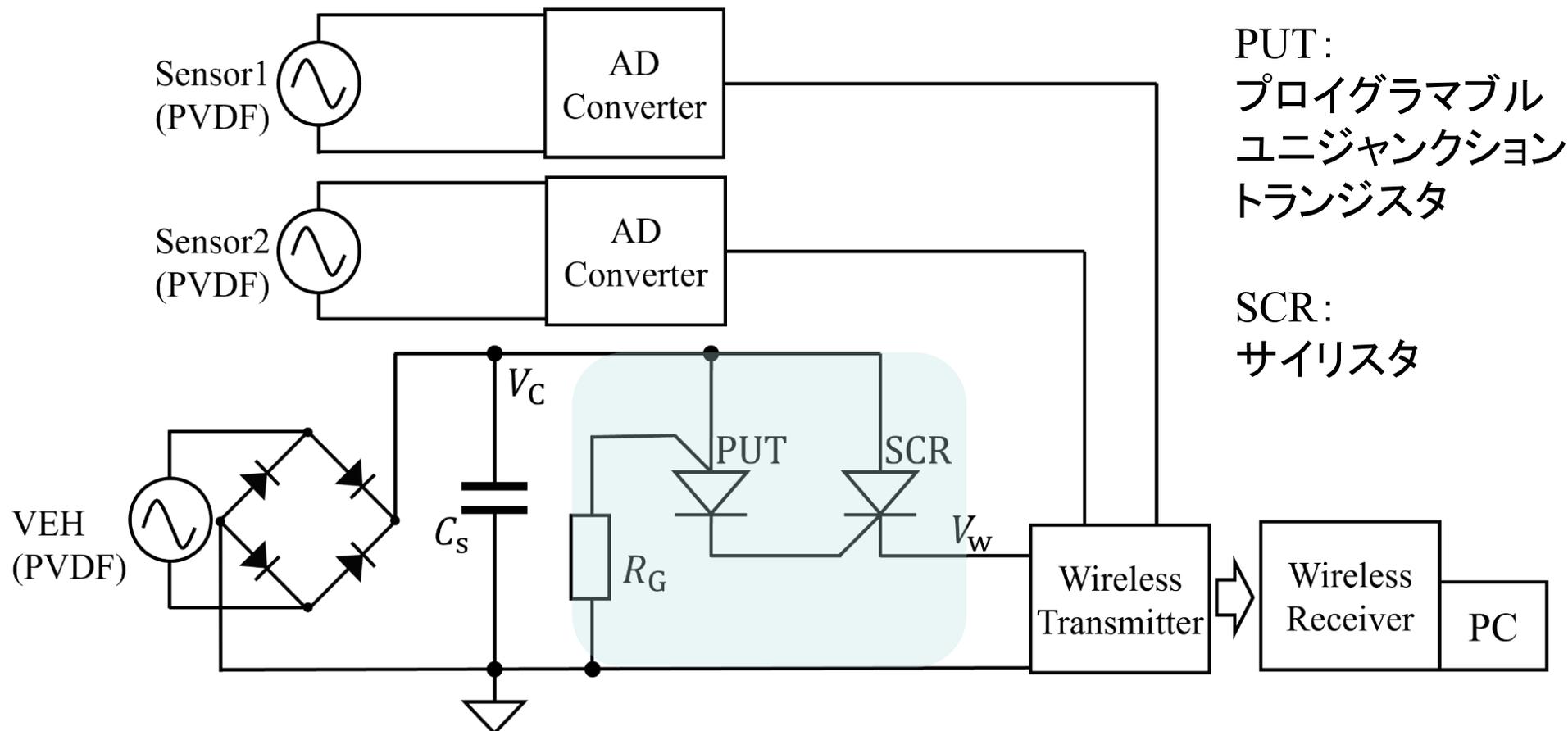
無線の間欠送信



ボルテージディテクタ
(DC/DCコンバーターに内蔵)

EHによる充電が一定値を下回ると電力供給をストップ
➡無線の間欠送信

【発明】アナログ素子を用いた間欠送信回路



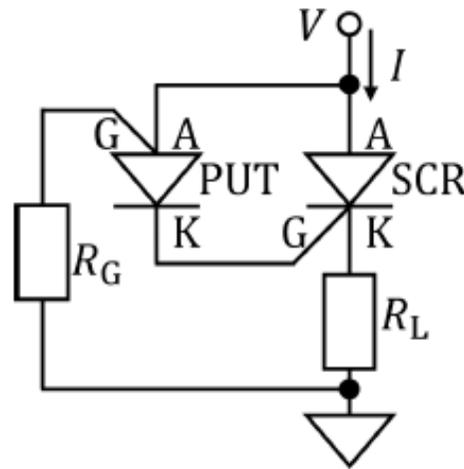
PUT:
プログラマブル
ユニジャンクション
トランジスタ

SCR:
サイリスタ

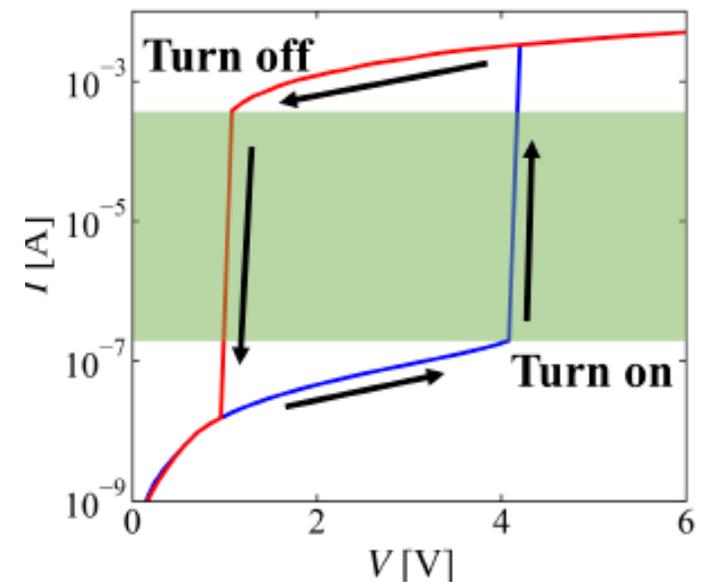
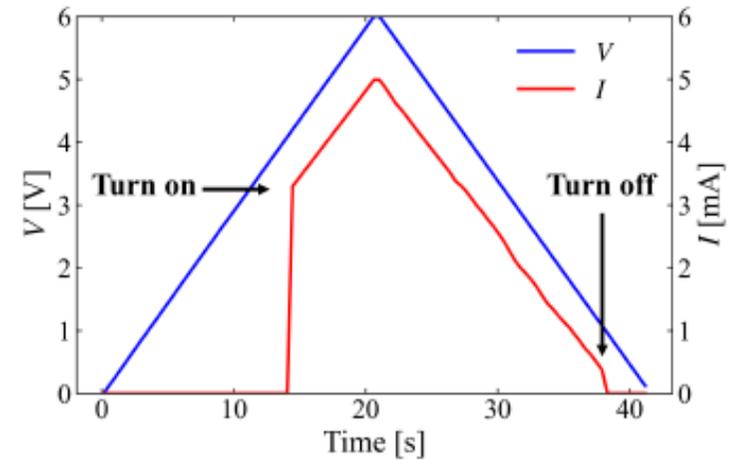


PUT-SCR直列多段回路

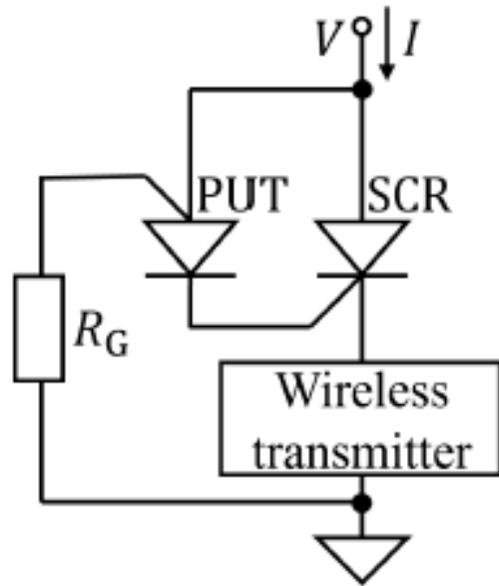
PUTとSCR
を直列に接続する



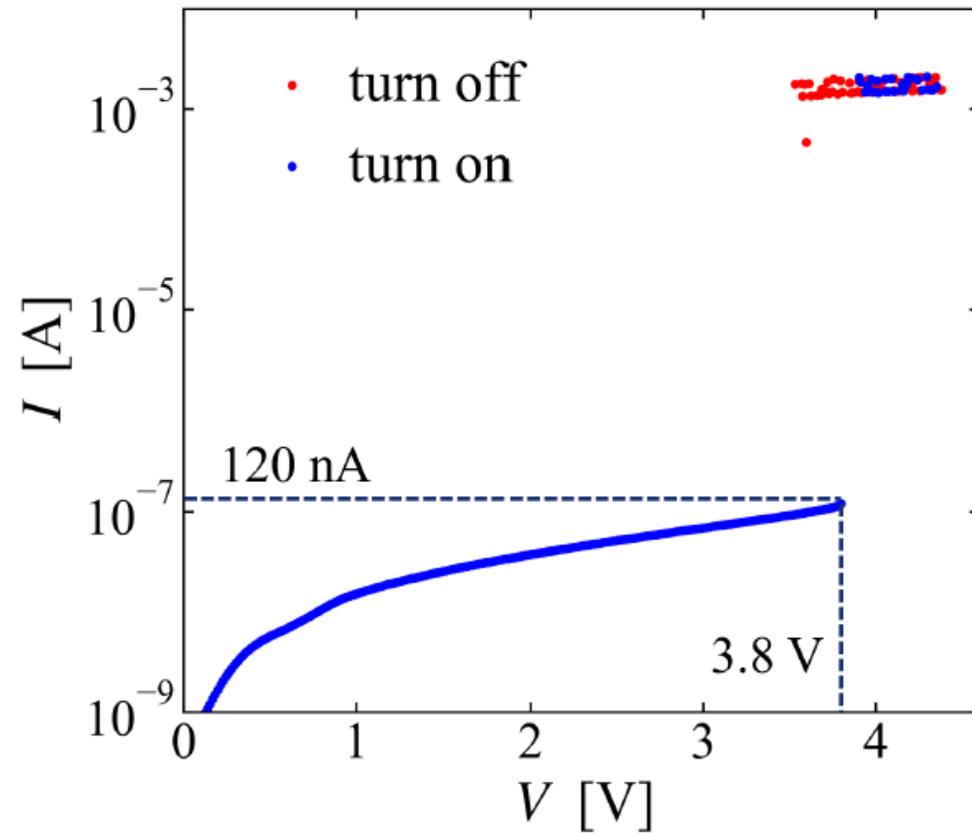
PUTの閾値でオン状態になり、
SCRの閾値でオフ状態になる
→コンデンサが空にならず、環境発電のような
微小電力発電においても無線が定期的に動作
可能になる＝データが有効活用できるようになる。



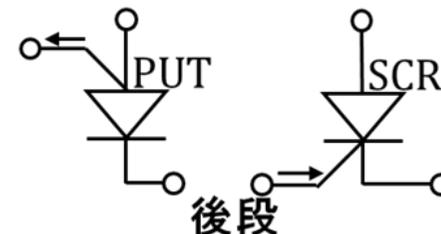
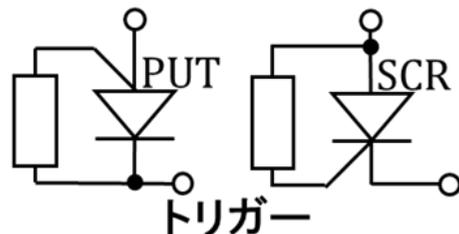
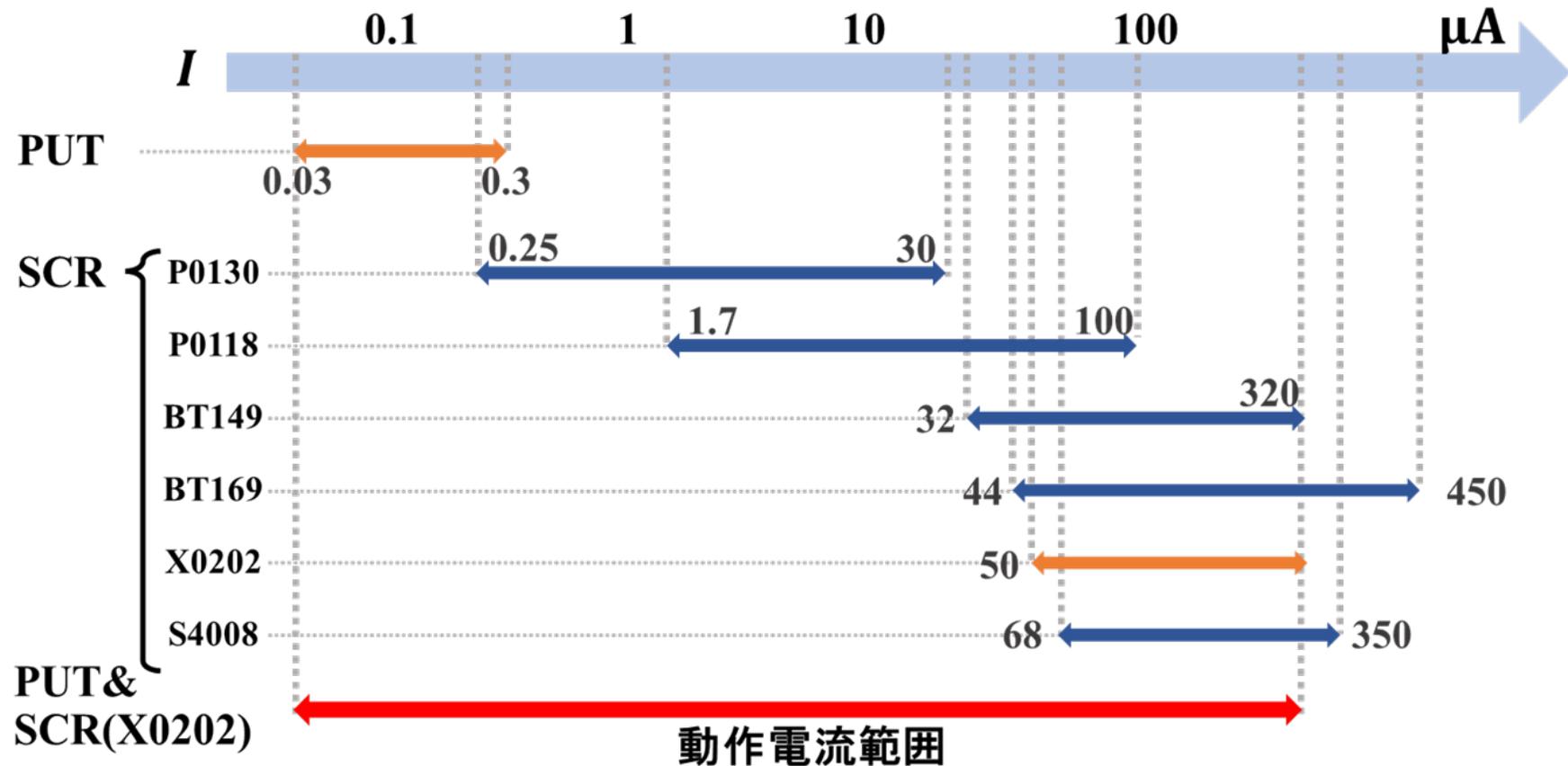
消費電力



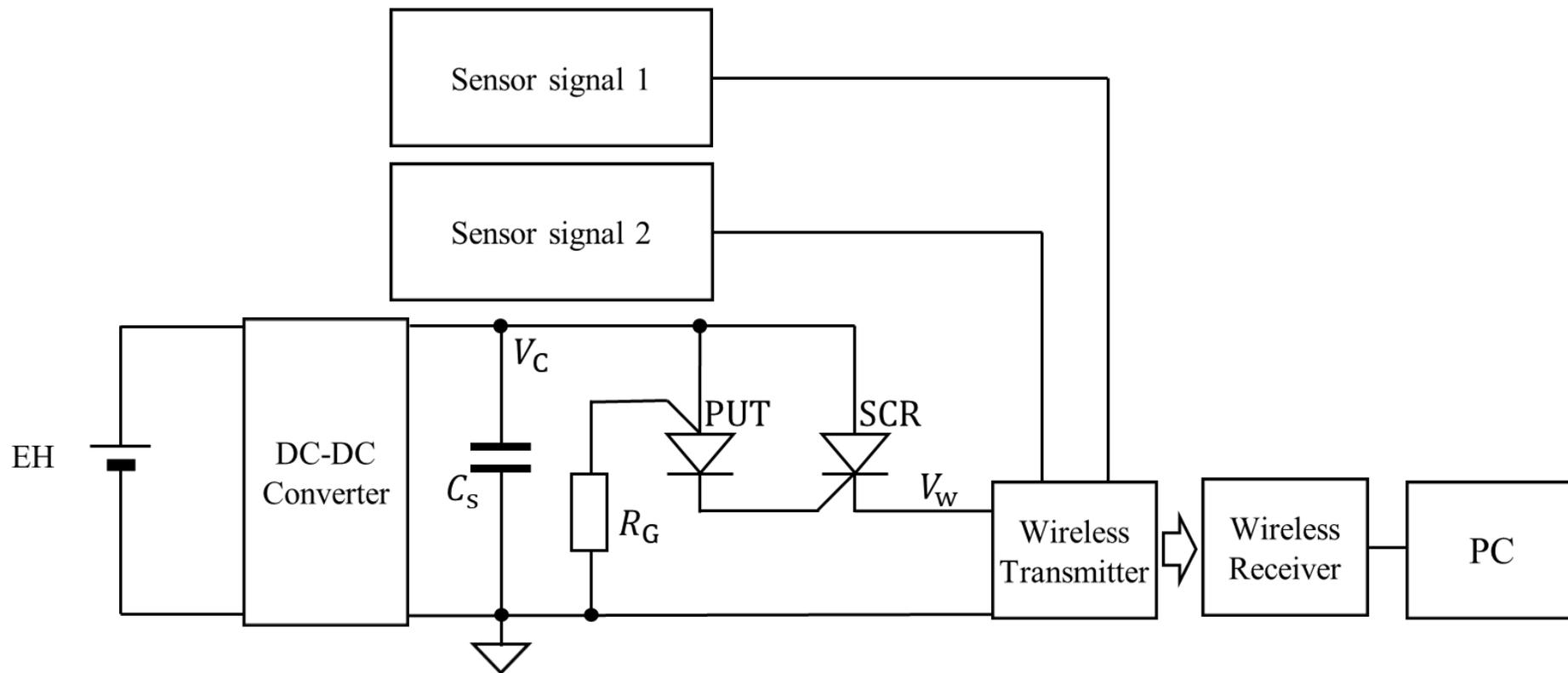
無線動作前のリーク電流は
120 nA
待機消費電力の最大値は
450 nW
(無線の最低発振電圧1.5V
では消費電力は180 nW)



動作電流範囲



直流のEHの場合



低インピーダンスのエネルギーハーベスティング(熱電、光電等)でPUT-SCRが動作する電圧に満たない場合は、前段に昇圧回路を用いる。

→EHの出力に応じた異常診断が行える(異常発熱、異常発光)

バッテリー混載型EHシステム

VEHはトリガーとして動作



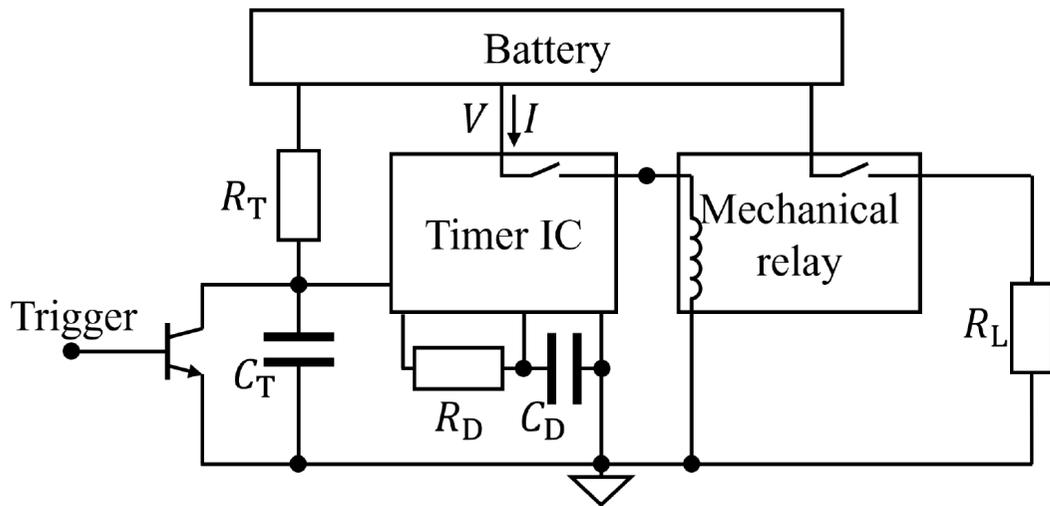
バッテリーが動作することで
高密度な無線送信が可能

特長

- バッテリー消費の抑制
- 無線送信距離の増加
- イベントドリブン動作での确实性を確保

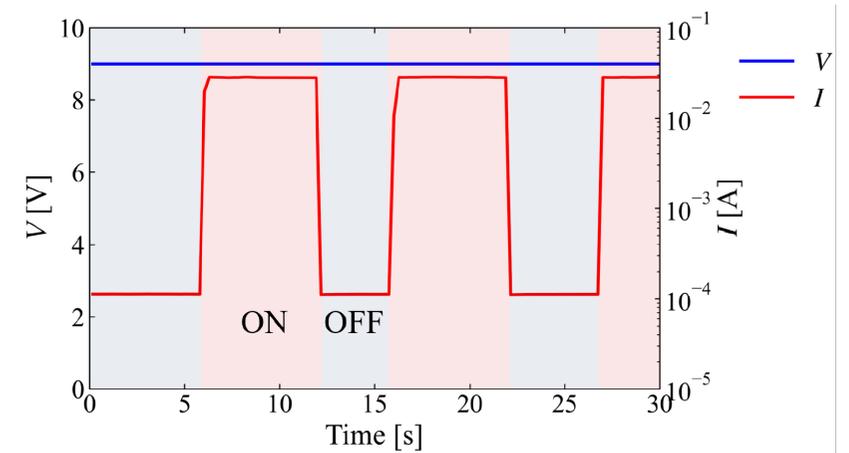
タイマーICの活用

タイマーIC



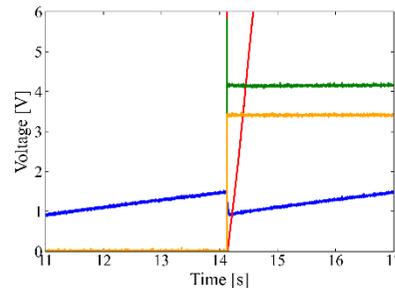
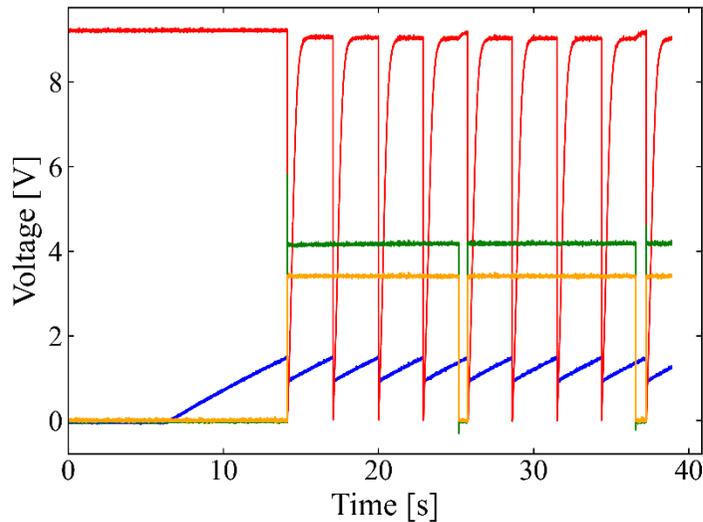
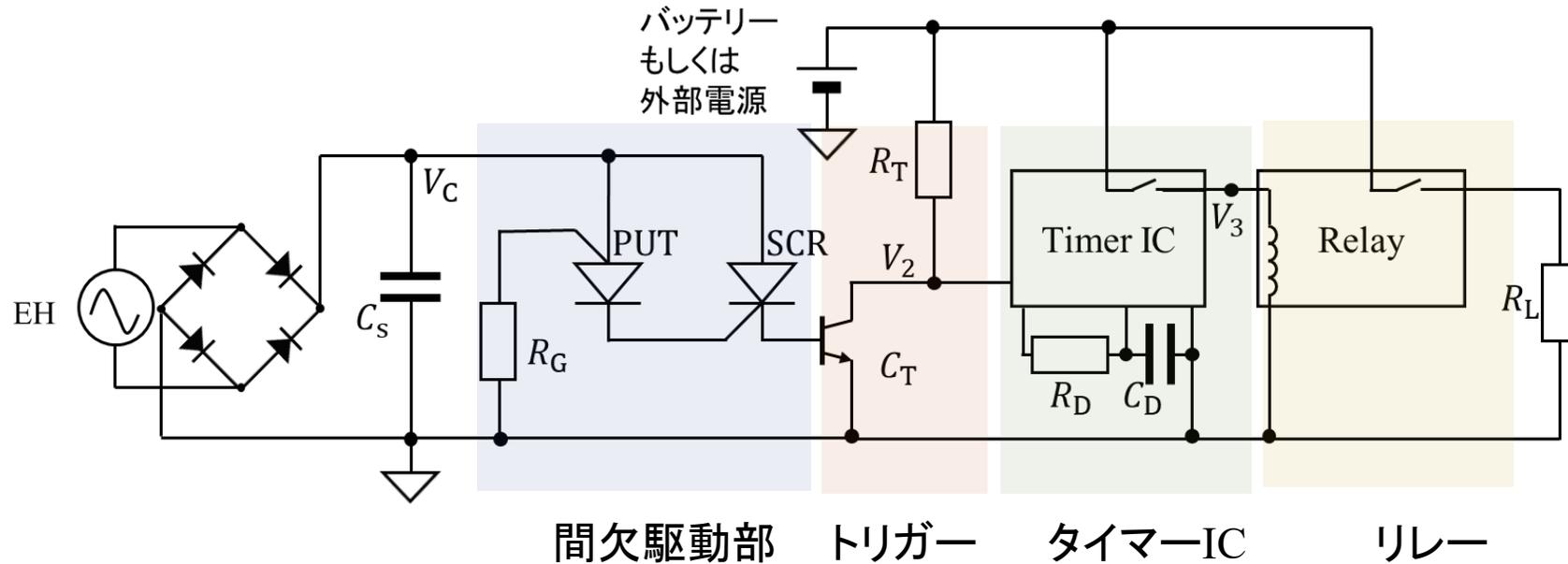
VEHとタイマーICを用いたバッテリー混載回路

負荷への電流



トリガーONで一定時間タイマーICが動作し、その後OFFになる

VEHをトリガーとして活用した間欠駆動



VEHが1.5 V充電後、
負荷に電力が供給される



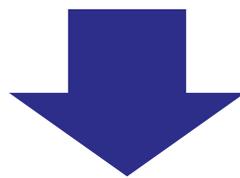
- 低振動環境で低出力な場合でも安定したイベントドリブン動作が可能
- データ転送量が多い→高精度化

小括

- 振動発電を用いてセンサーの電圧値を無線送信するシステムを構築した。
- バッテリーレス故障診断システムによる限られたデータ量において、教師あり分類法で94.8 %、教師なし異常検知法で97.8 % という精度で正常状態と異常状態の診断に成功した。
- 機械学習においてはセンサーデータに加え、データ送信間隔を特徴量として解析することで精度が向上することを確認した。
- 多段PUT-SCR回路を用いることで、間欠無線駆動の動作時間を任意に調整できるシステムを構築した。それによって、異常診断の精度が向上可能。
- タイマーICを用いることでVEHをトリガーとして活用するバッテリー混載システムを構築した。

従来技術とその問題点

エネルギーハーベスティングを用いて、バッテリーレスで無線を送信する事例はあるが、解析まで含めた実用化事例はほとんどない。



バッテリーレスで得られたスパーデータの有効な活用方法が示されていないことがひとつの問題点として考えられる。

新技術の特徴・従来技術との比較

- エネルギーハーベスティングを用いて、無線を間欠的に送信することで、異常診断および異常検知の精度を向上できる。
- 完全バッテリーレスでの異常診断・異常検知が可能である。振動以外の、熱や光等による発電でも実施は可能。
- 長距離無線などを使用する場合は、バッテリー混載回路などが活用できる。

想定される用途

- 半導体製造工場での装置の常時異常モニタリング
- 異常振動、異常発熱、照明の有無、漏水等によって反応するバッテリーレス監視システム
- 自動車や人の侵入を検知する監視システムなど

実用化に向けた課題

- モジュールを小型化、低価格化して、様々な場所に容易に設置できるようにしていく必要がある。
- 低消費電力な充電回路・無線モジュールとの一体化も必要。
- 実用化に向けて、異常診断・異常検知の精度を100%まで向上できるように技術を確立する必要がある。

企業への期待

- エネルギーハーベスティング技術を有する企業と様々な異常を検出するシステムの開発
- ユースケース創出に向けた実証実験
- 多段SCR回路のチップ化
- バッテリー回路や無線素子との集積

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : センシング装置
- 出願番号 : 特願2024-144567
- 出願人 : 東京理科大学
- 発明者 : 中嶋宇史, 佐藤智浩

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 無線センサ装置及び状態推定システム
- 出願番号 : 特許第7107492号
(2022.7.19登録)
- 出願人 : 東京理科大学
- 発明者 : 中嶋宇史

お問い合わせ先

東京理科大学
産学連携機構

TEL 03-5228-7440

e-mail shinsei_kenkyu@admin.tus.ac.jp