

中小製造業IoT化のためのCPS (サイバーフィジカルシステム) の構築

2023. 11. 22

立命館大学

清水正男

家内制手
工業

問屋制
家内工業

工場制
手工業

労働力の集約
(マニユファクチュア)

Society 1.0
狩猟社会(縄文時代、～前10世紀)

Society 2.0
農耕社会(弥生時代、～3世紀)



琵琶湖第1疏水 (1890年)

産業革命

(18世紀中～19世紀)

動力源(蒸気機関)を得たことにより、生産性が飛躍的に向上



大正8年 (1919年)

工場制
機械工業

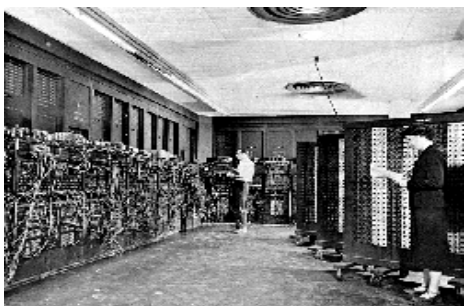
Society 3.0
工業社会



フォードTモデル
(1908年販売開始)



Modern Times 1936年
機械化する時代を風刺



終戦(1945)天気予報のシミュレーション (1946)

Society 4.0
情報化社会

インターネット、スマートフォン



TRON (1982年) で想像する未来像

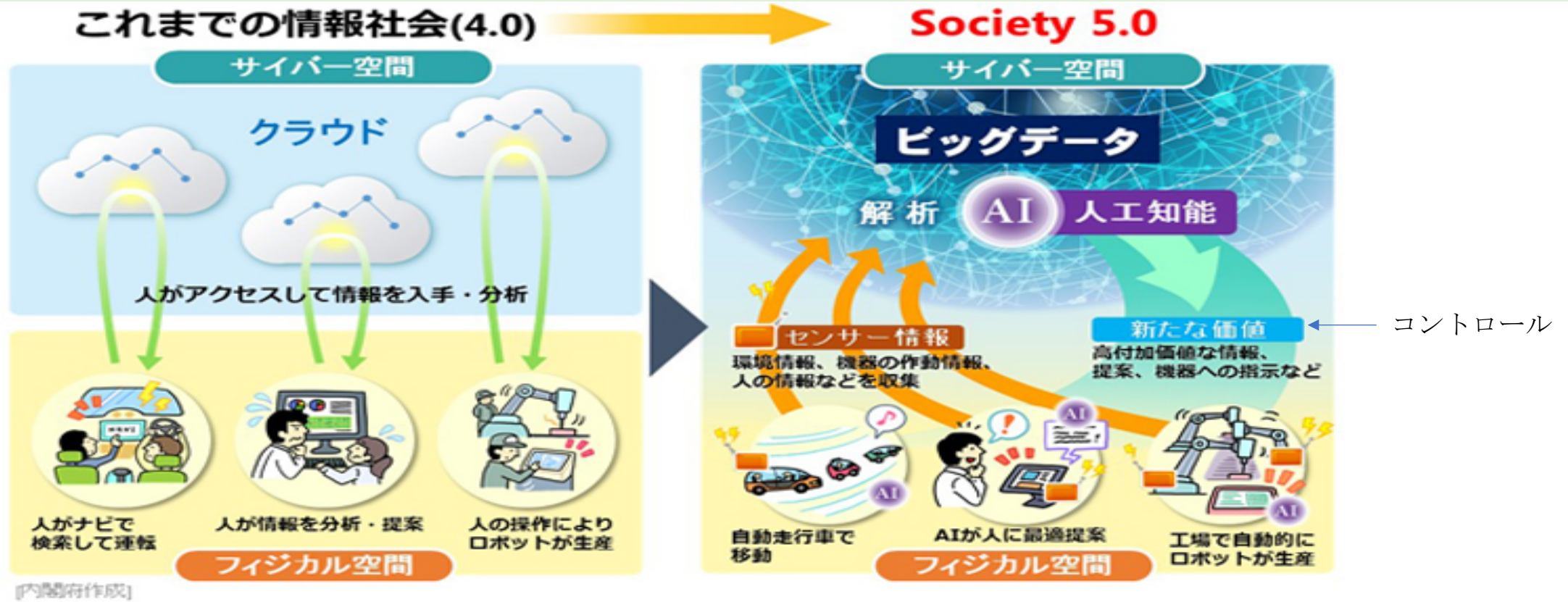
Society 5.0
超スマート社会

ロボット、AI、自動運転、ドローン...

タケコプター、翻訳こんにやく、...

現在

未来は明るい？ 20XX年問題とは



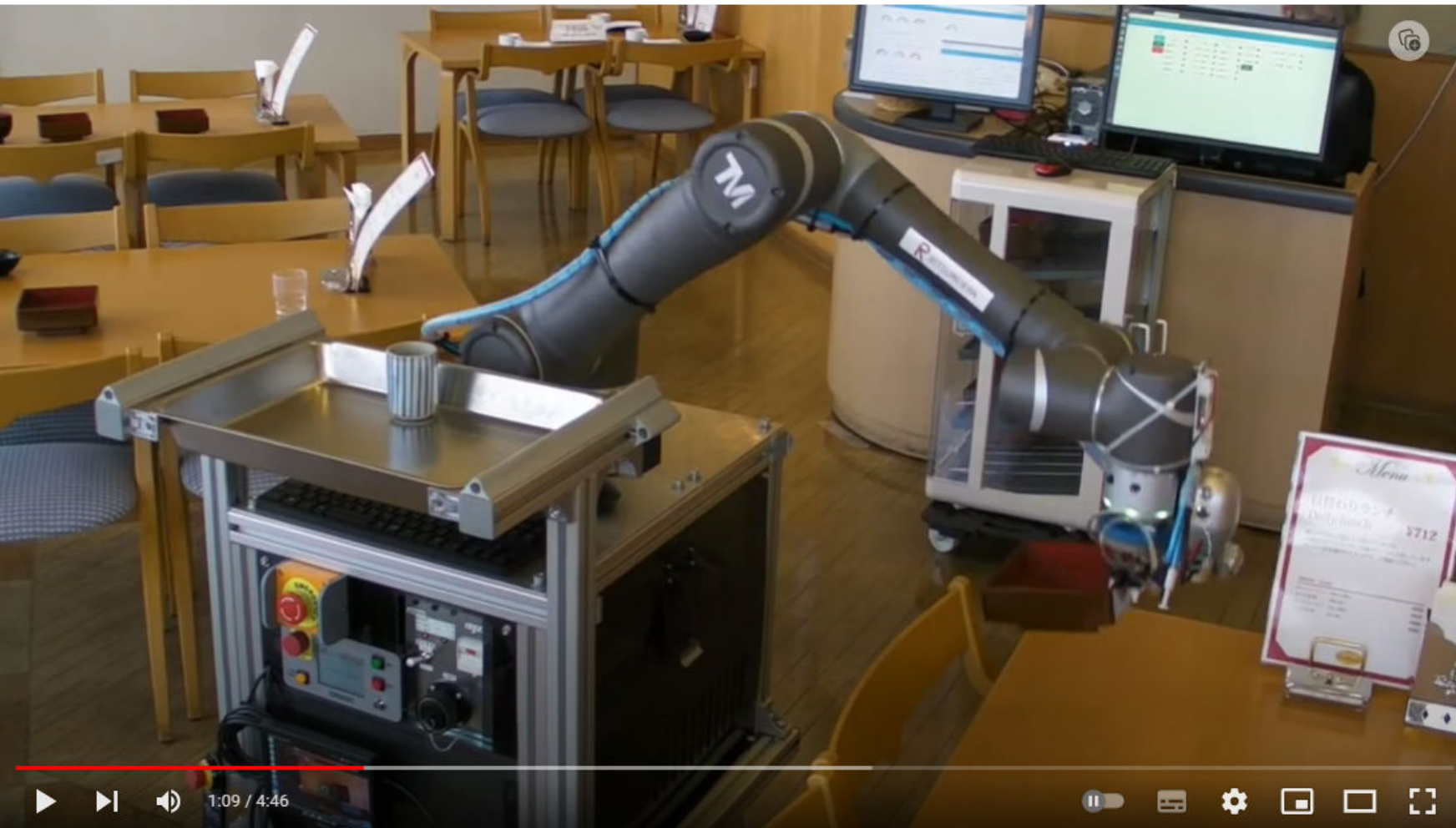
出典 内閣府HP : https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/

2030問題

出典 : <https://www.pasonagroup.biz/hint/90>
(総務省統計局資料のまとめ)

	2021年9月時点	2025年推計	2030年推計	2040年推計
総人口	1億2,522万人	1億2,254万人	1億1,913万人	1億1,092万人
65歳以上の人口 (割合)	3,640万人 (29.1%)	3,677万人 (30.0%)	3,716万人 (31.2%)	3,921万人 (35.3%)
75歳以上の人口 (割合)	1,880万人 (15.0%)	2,180万人 (17.8%)	2,288万人 (19.2%)	2,239万人 (20.2%)
生産年齢人口 ※15~64歳	7,402万人	7,170万人	6,875万人	5,978万人

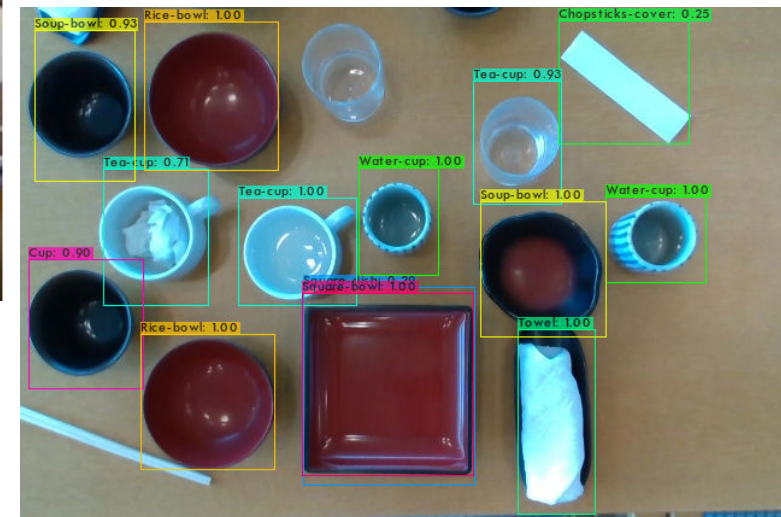
モバイルマニピュレータを使った下膳作業



<https://youtu.be/zvV-qtazNhU>



把持位置値の計算



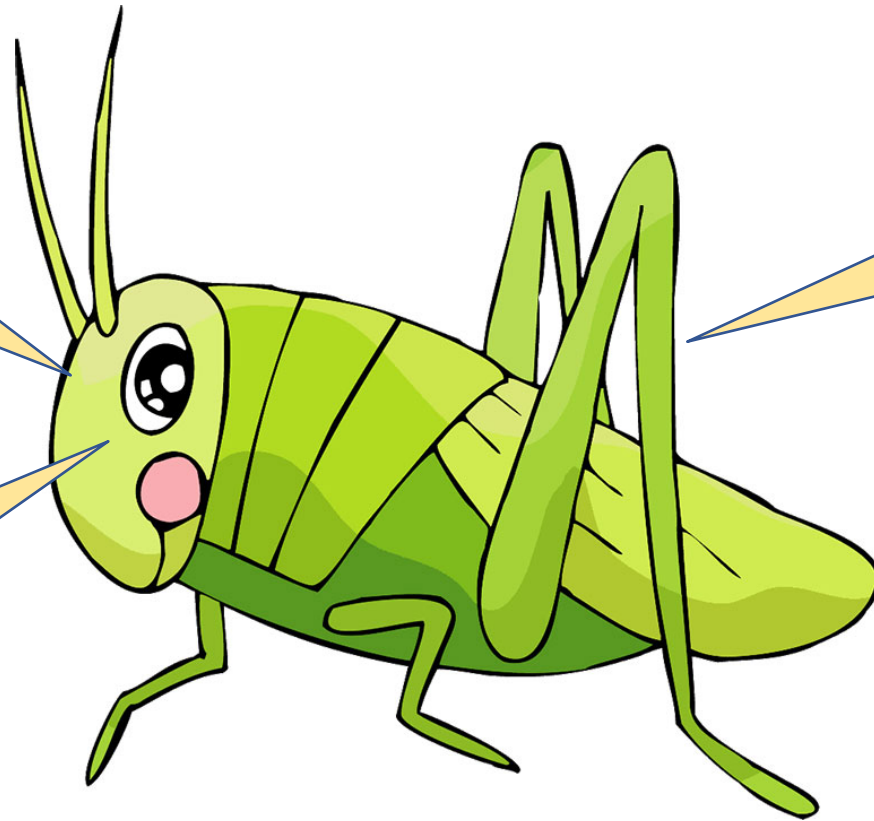
食器の分類

バッタ ロボット登場

コンピュータ
(脳・神経・
・)

アクチュエータ
(手・足・羽・
・)

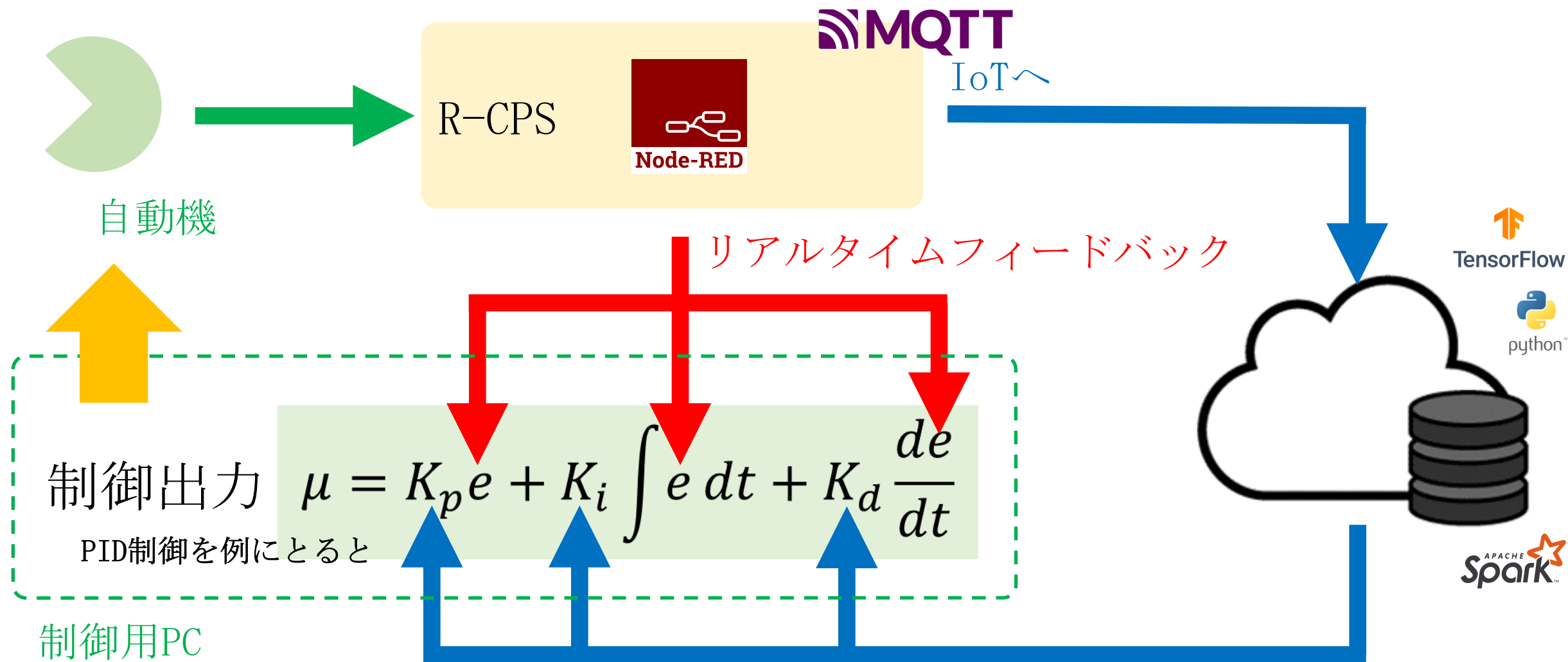
センサ
(目・耳・鼻・
・)



昆虫のハードの性能は非常に高い！

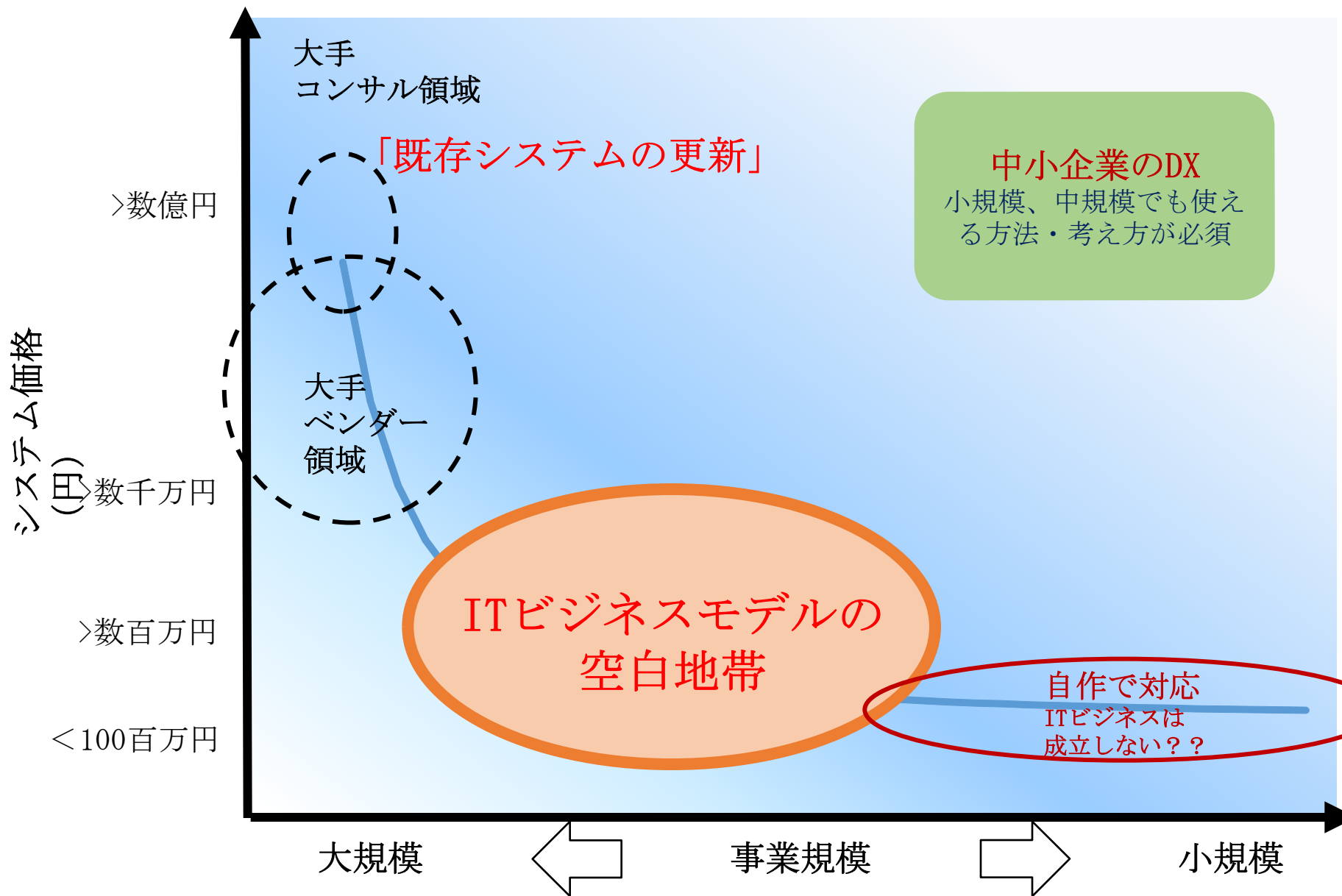
脳は1つ (クラウド) だけで良いのか？
進化には、個体ごとに脳が必要では？

センサ、コンピュータ、アクチュエータはロボットを構成する大切な3要素
センサ・アクチュエータ：実空間 コンピューター：仮想空間



IoTからの定期的なフィードバック

e : 変数(偏差)
 K_p K_i K_d : 定数



中小企業特有の課題

- 必要性和、目的が不明確
- 専任の技術者がいない (割り当てられない)
- 十分な仕事量が見込めない



DXを俯瞰できる、
街のSIer (個人/副業)
の育成と活用

※DX: デジタルトランスフォーメーション

ご当地ネタ ・ ・ 滋賀は歴史に残る、モノづくり現場におけるリスキリングの先駆け

当時のリスキリングのキーワードは・・・



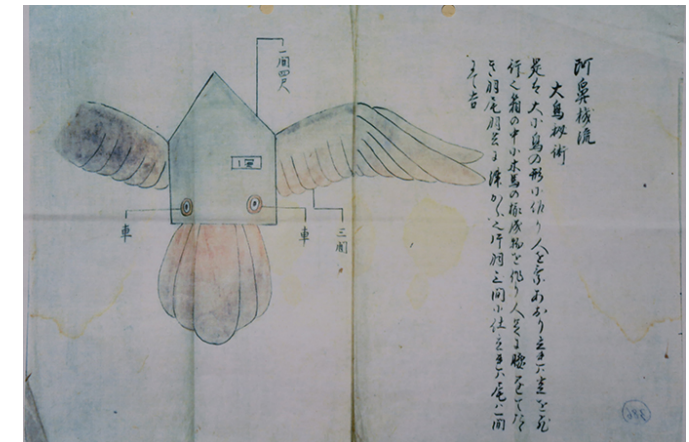
江戸中期ごろ当時、武具や武器の制作にたずさわっていた塗師、指物師、鍔金具師などの職人が転向し、彦根で仏壇製造が始まったとされる。



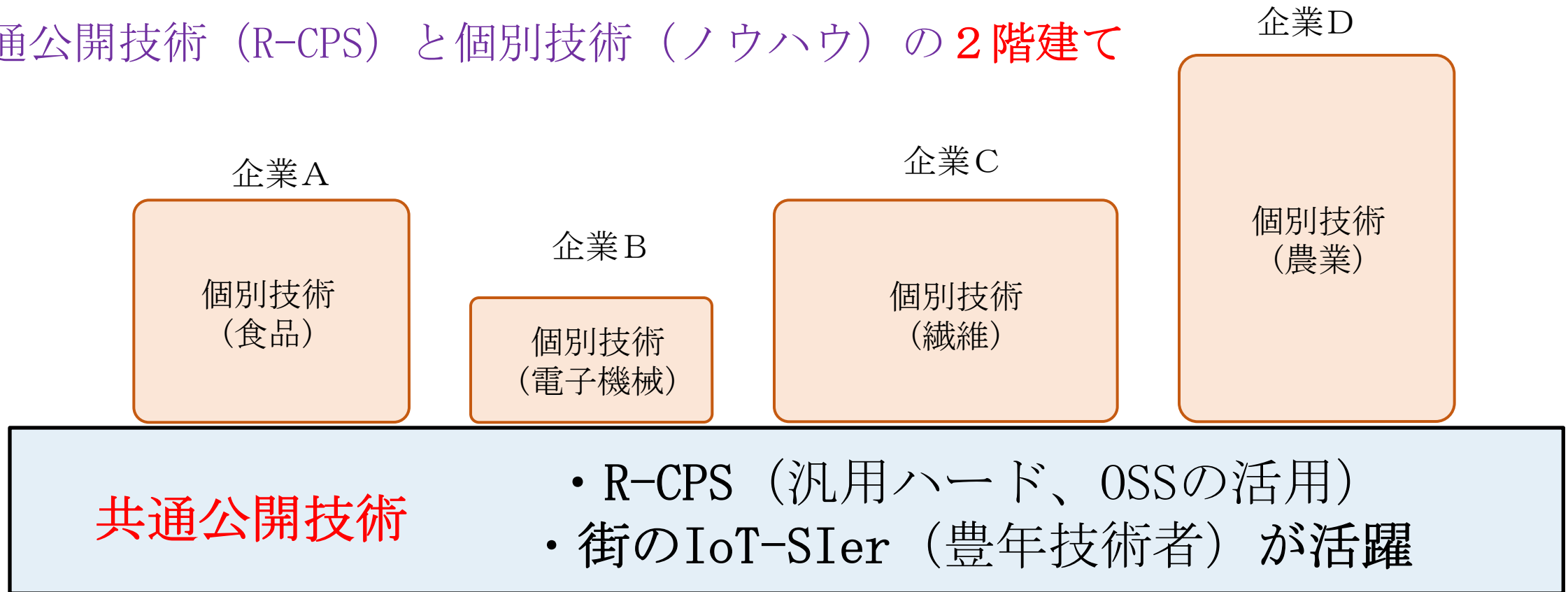
出典：<http://www.hikone-but sudan.net/ja/assoc/history.php> (彦根仏壇協同組合)

国友一貫斎の鉄砲技術から、長浜仏壇・飛行機 の原型や望遠鏡へ

基礎となる技術を基に、未来を創造することが肝心



共通公開技術（R-CPS）と個別技術（ノウハウ）の2階建て

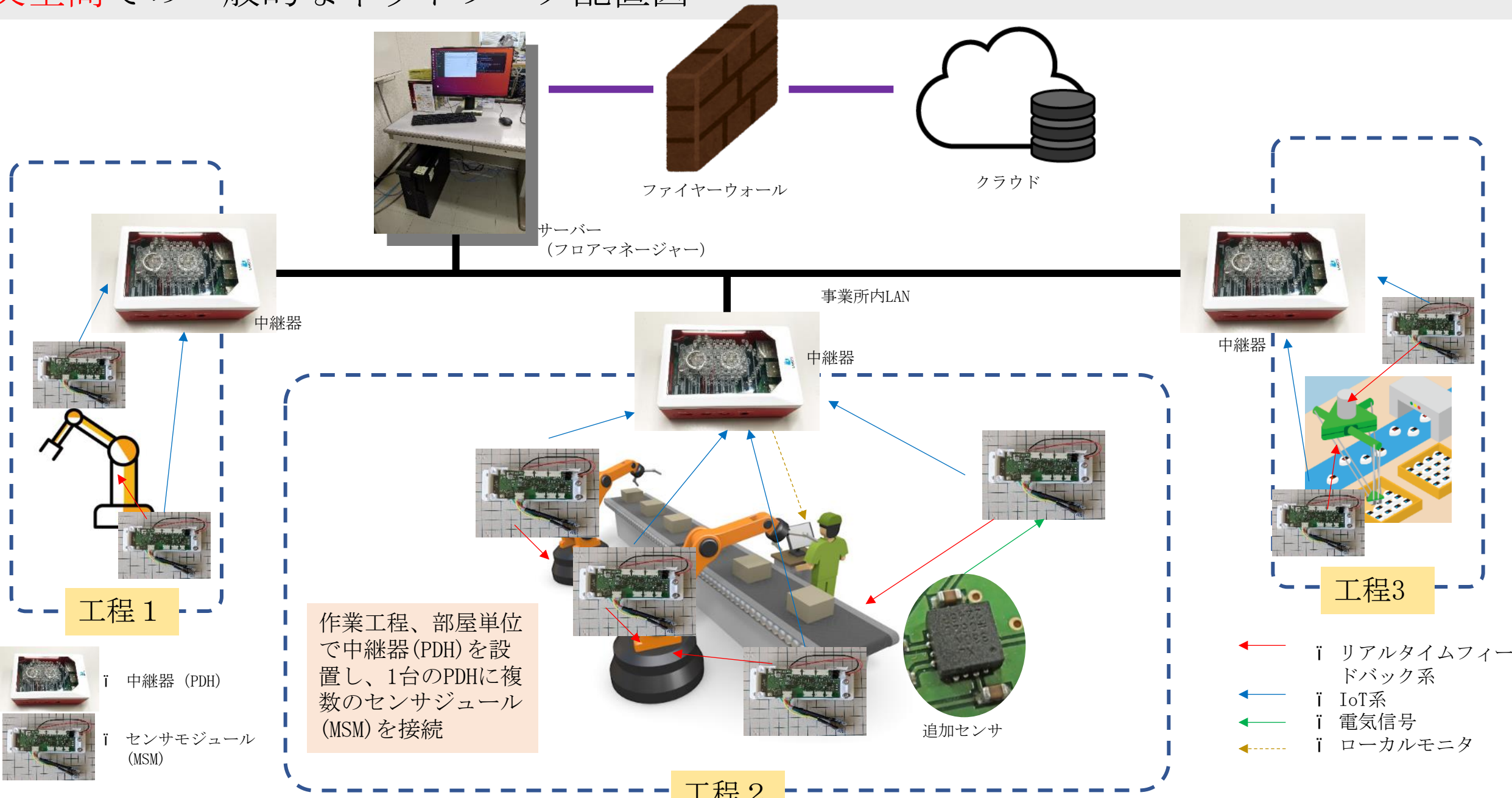


数社をまとめて担当する街のIoT-SIer(地域密着型SIer)の仕組みが必要

- ・フリーランスSIer(特定のユーザー企業に所属しないSIer)
- ・企業内SIer(業務兼任SIer)
- ・副業SIer(企業内SIerでかつ、他企業を共通公開技術領域でサポート)

※R-CPS:Reconstructable basic system for Cyber Physical System 豊年技術者:経験が豊富な年齢が高い技術者

実空間での一般的なネットワーク配置図

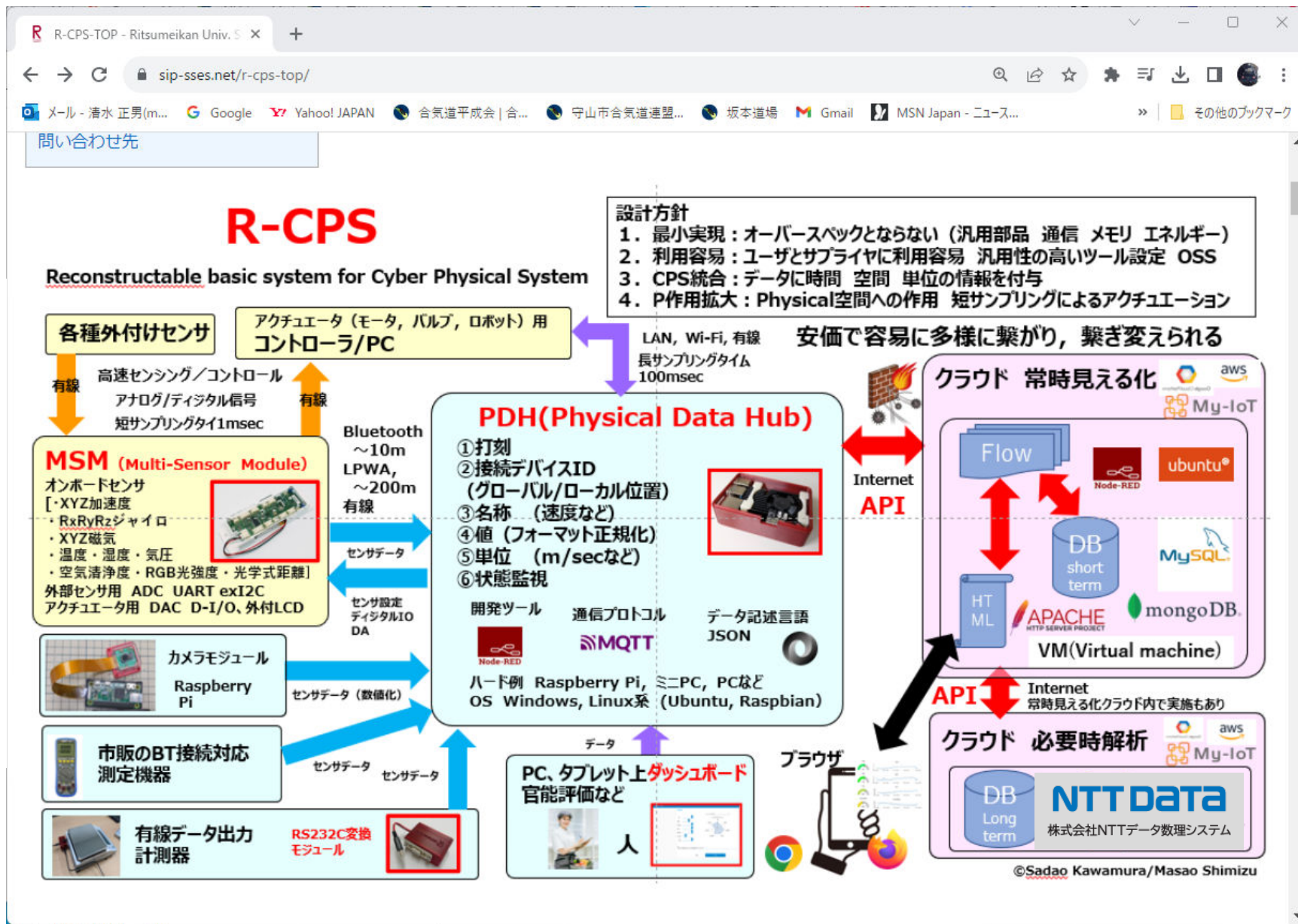


<https://sip-seses.net/r-cps-top/>



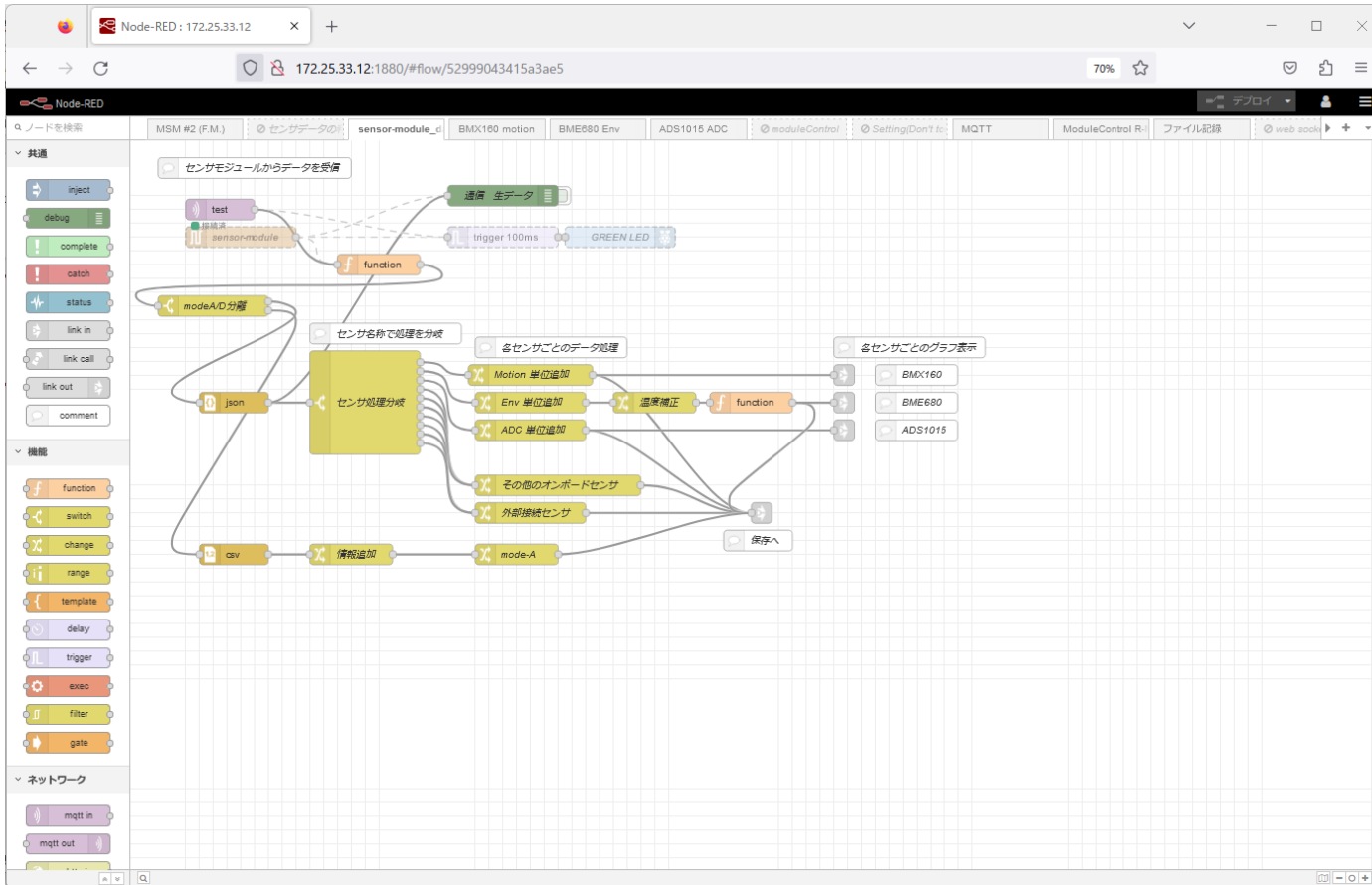
本ページのURL

本文の閲覧は、ユーザ申請をお願いします



フロー形式のプログラミングNode-REDが簡単！

データの双方向通信はMQTTで！



Node-REDの編集画面

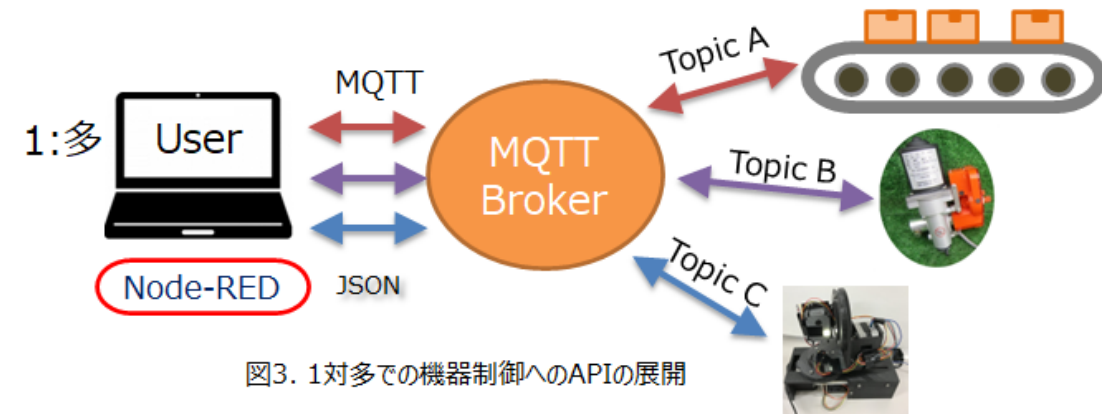
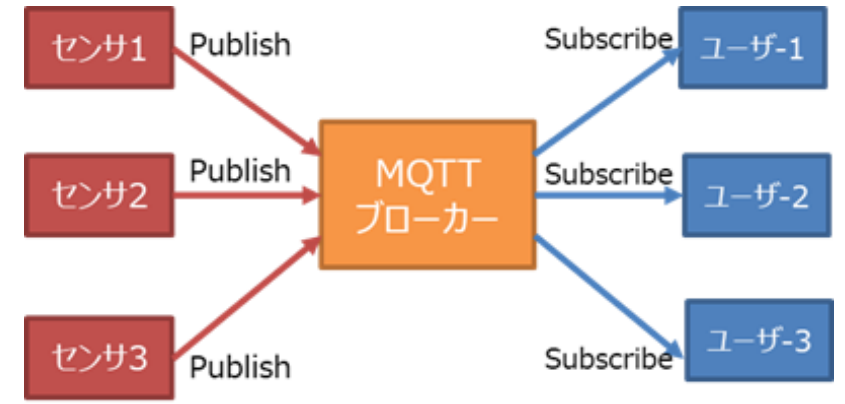
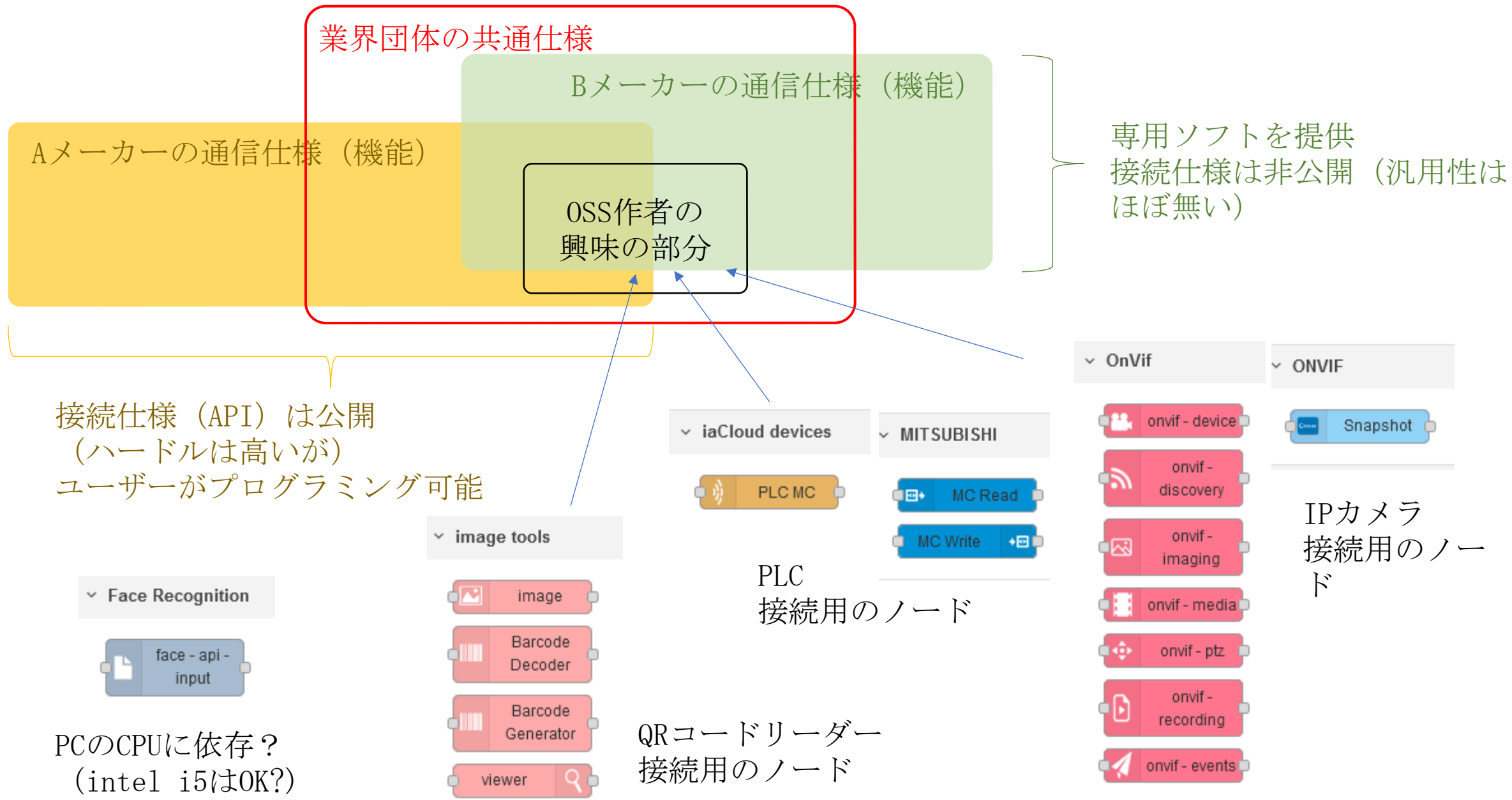


図3. 1対多での機器制御へのAPIの展開

MQTT (Message Queue Telemetry Transport)

Node-REDとMQTTを使ったシステム構築がお勧め！！

OSS (Open Source Software) で直面する課題 (Node-REDの例)



i 利点

課金されない。(比較的) 使い易い

i 問題点

誰がメンテナンスしているの? 機能更新やバグ修正は?

利点・問題点を理解した上で、積極的に使っていくべき

「OSSは問題点が多いから、使わない」という認識が広がらないようにすることが大切

探査 ⇔ **管理** を繰り返すことで、個別課題のIoTを進化

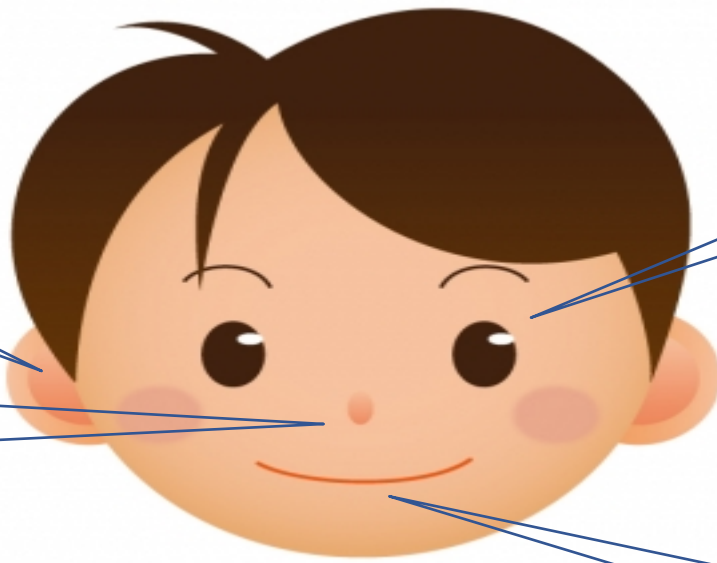
状態	パラメータ	結果への期待	データ収集	目標・目的
探査	どんなパラメータが有効なのか不明	実験（投資）に対する効果は不明	装置改造はせず、簡単に安価でセンサを取り付けたい（テスト後は簡単に取り外したい）	有効なパラメータの発見
管理	注目すべきパラメータは既知	工程の安定化には必須	予めセンサを挿入した生産ラインの構築や既存装置を改造	データの推移を監視 異常値を検出

生物模倣技術から見えてくる理想的なパッケージ（装着部位）

- i 人間の頭部を考えると・・・
- ii 三半規管（加速度センサ）は頭蓋骨の中、
- ii **大気暴露が必要な**、目（画像センサ）、耳（音響センサ）、鼻（ガスセンサ）は頭蓋骨の外、あるいは、穴。

●音響センサ
・外耳道は防水構造
・耳殻は集音機

●ニオイセンサ
・気体を吸い込むこと
（気流）で感度アップ



●画像センサ
・眼窩（がんか）の形状は眼球保護
・瞼（まぶた）は必要な時だけ開くシャッター

センサ（感覚器）はCPU（脳）の近くに配置
⇒ 伝送ノイズ低減

●味覚センサ
・イオンセンシング
・水分がある口中

頭蓋骨は、パッケージのお手本。天然の最高パッケージ

一言で言うと・・・

物理量・化学量などを**電気信号(電圧・電流)**に変換する装置

信号変換後の実装例：

- ・ 空気圧 (圧力という物理量) ⇒ 高度計、血圧計
- ・ 気体アルコール濃度 (化学量) ⇒ 呼気中アルコール濃度測定
- ・ 空気の振動 (圧力変動) ⇒ 音 (マイクroフォン)
- ・ 電磁波 (赤外線) ⇒ 輻射温度計、人体検出、防犯設備 (夜間の侵入検知)
- ・ 可視光 (明るさ、色) ⇒ 2次元的に測定すると撮像素子 (デジタルカメラ)
- ・ 温度 (飽和状態) ⇒ 電子式体温計 (体の深部の温度)
- ・ ほかにも・・・

☆ロボットとの関係：**センサ (触覚)** ・ コンピューター (脳) ・ アクチュエーター (手足) の重要な領域のひとつ
オーソドックスな電気計測も重要 ⇒ 人体に生じる電気 (微弱な電圧変化) ⇒ 心電計

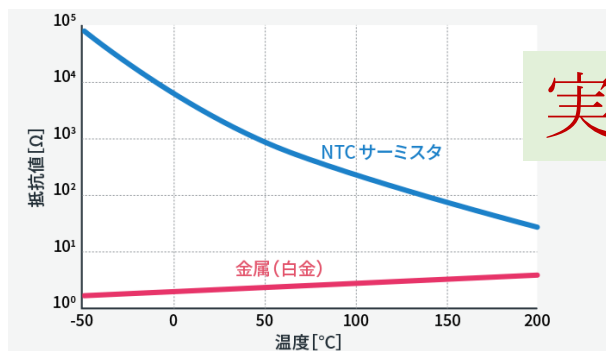
測定場所は?

(時空間での場所)
例えば、室温は部屋のどこ
で何時

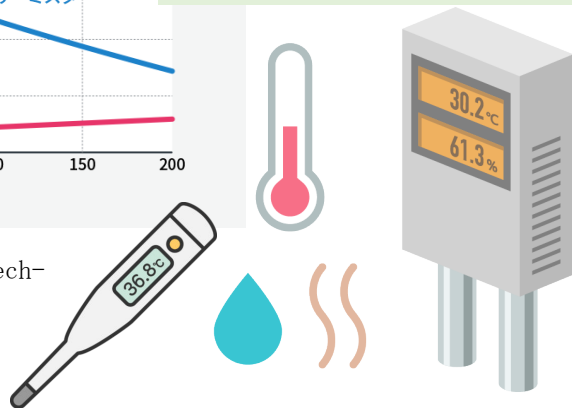


単位は?

- ・ 摂氏 $^{\circ}\text{C}$
- ・ 華氏
- ・ 絶対温度K (ケルビン)

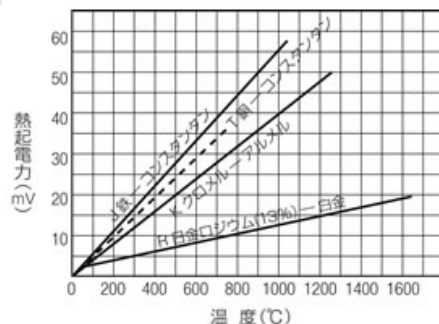


出典：
<https://www.tdk.com/ja/tech-mag/core-technologies/06>



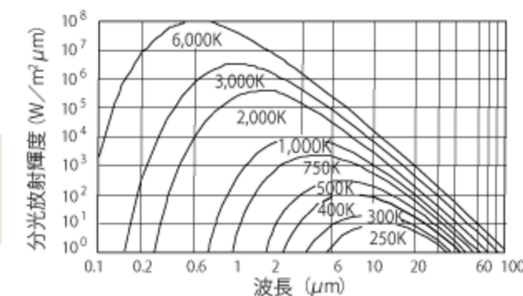
電気抵抗変化 (サーミスター)

実空間で温度を測るデバイスは多種多様



出典：<http://www.aoi-e.com/product03.html>

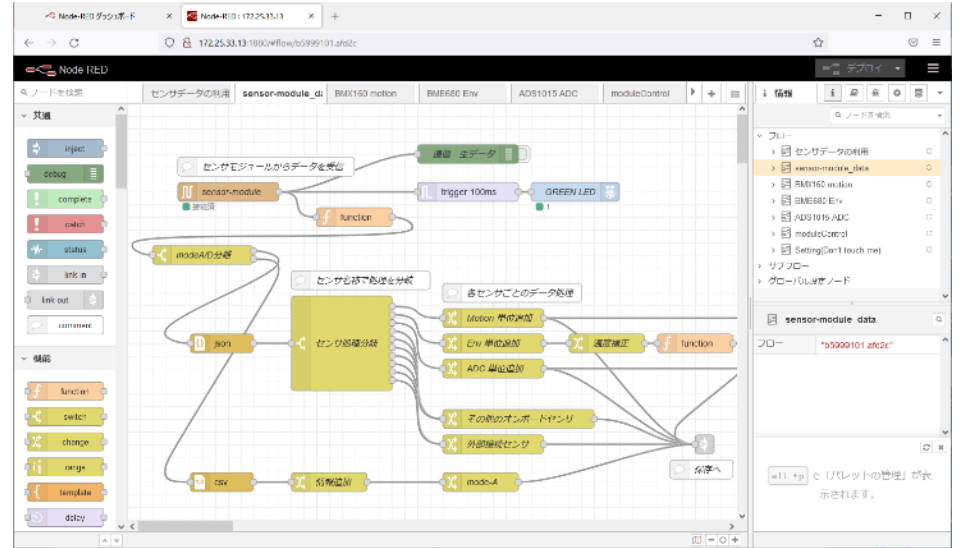
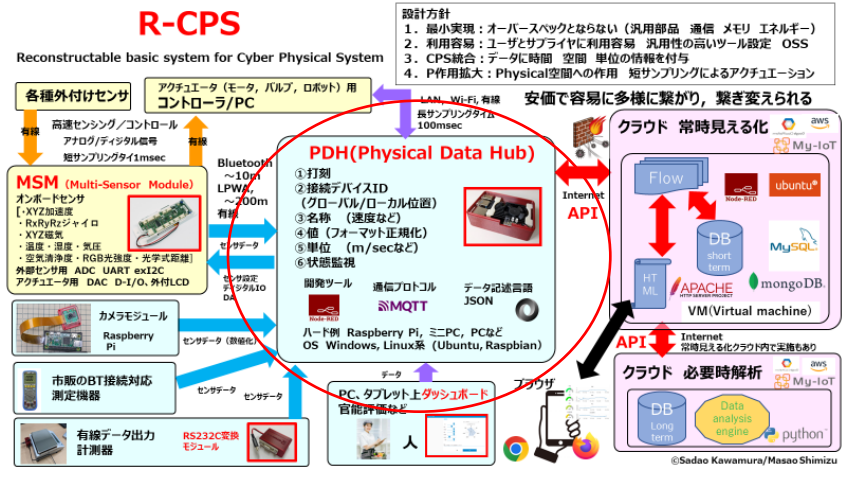
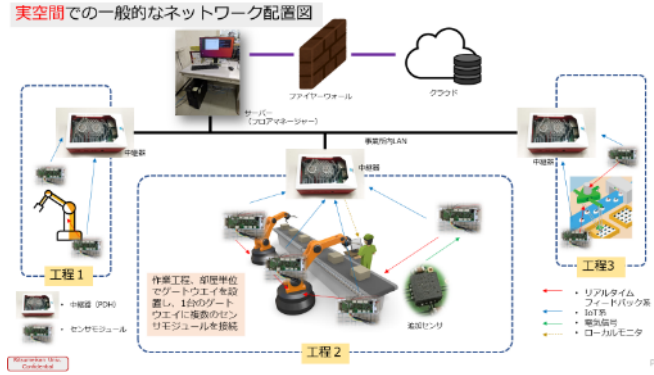
熱起電力 (熱電対)



熱放射 (非接触)

出典：
<https://www.horiba.com/jpn/process-and-environmental/products/infrared-radiation-thermometer/infrared-thermometry/>

IoT系出力 (CPS) 中継器 (PDH:Physical Data Hub) でのデータ処理



PDH内のプログラムはNode-RED

物理的な通信の中継機能に加えて、データ処理の機能

- **単位** SI単位系に準じ(物理化学値)に値を変換し、単位を付ける
名前、値、単位をひとまとめにして扱う 例(CO2濃度、408.33、ppm)
- **書式** JSON
例 { "name" : "CO2", "value" : 408.33, "unit" : "ppm" }
{ "gas" : ["N02", 3.70, "mg/L"] }
- **時空間での位置を定義**
打刻 (時間) UTC { "datetime" : "2022-10-17T13:30:32.6330349+09:00" }
識別 (空間) 場所、デバイスID (PDH, センサ) { "room" : "3F-01" }
- **状態監視** 計測系の診断 (通信エラーや外れ値の発生頻度)

単位は重要

「単位間違い 事故」
で検索

クラウド側で10
と受け取っても・・・

- 10V ?
- 10mV ?
- それとも
- 10N ?
- あるいは
- 諧調値の10?

R-CPS
Reconstaructable
だから

なお一層重要



3つのデータを送信する場合例

センサ1 (濃度、値、単位)、センサ2 (圧力、値、単位)、
センサ3 (加速度、値[x, y, z]、単位)

書式: CSV

```
sensor1, concentration, 408.33, ppm, sensor2, pressure, 1013.25, hPa, sensor3, acceleration, 9.80, 0.01, 1.03, m/s2
```

書式: XML (省略)

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes" ?><root>  
<device>sensor1<lavel> "C02" </lavel><value>408.33</value>  
<unit> "ppm" </unit></device> . . . .
```

書式: JSON (JavaScript Object Notation)

```
{"sensor1": {"label": "C02", "value": 408.33, "unit": "ppm"}, "sensor2": {"label": "pressure", "value": 1013.25, "unit": "hPa"}, "sensor3": {"label": "acceleration", "value": [9.80, 0.01, 1.03], "unit": "m/s2"}}
```



```
{  
  "sensor1":  
  {  
    "label": "C02",  
    "value": 408.33,  
    "unit": "ppm"  
  },  
  "sensor2":  
  {  
    "label": "pressure",  
    "value": 1013.25,  
    "unit": "hPa"  
  },  
  "sensor3":  
  {  
    "label": "acceleration",  
    "value": [9.80, 0.01, 1.03],  
    "unit": "m/s2"  
  }  
}
```

Stringsで扱おうと上記 (↑)、
objectとして扱おうと右記 (→)
(見え方は違うが、全く同じ内容)



The screenshot shows a web browser window with the URL `sip-sses.net/safety/`. The page header includes the SIP logo and navigation links: ホーム, 推進体制, 公開情報, 実証実験フィールド, 研究開発状況, お問い合わせ, ログアウト. The main content area features the title **安全機能の追加** and several paragraphs of text in red and black.

安全機能の追加

機器を遠隔で制御する場合、必ず安全であることを確認してください。例えば、扉の開閉を行う場合には、人や物が挟まれないか等、十分注意して制御システムを構築してください。インターロックなどの安全機能を必ず追加します。パトライトの点滅やブザーの発報などを行ってから、機器の動作を行うことをお勧めします。

人間の誤操作や、機器の誤作動に対する対策を必ず考慮しなければなりません。前者をフルプルーフ (foolproof) と言い、後者をフェイルセーフ (fail safe)と言います。

例えば、電熱器をON/OFF制御するケースを考えると、OFFの信号を受け付けなくなり、加熱し続けてしまう異常事態を想定し、事前に対策を講じておく必要があります。例えば、WDT(watchdog timer)を制御系とは独立した別回路として設け、設定時間以上連続してONが続いた場合には、強制的にOFFにする回路を付加するなどです。

尚、WDTによる監視回路は、駆動回路の直近に組み込むことが必要で、例えば、ノーマリーオープン(N.O.)のリレー接点などを使い、制御側からの信号の有無にかかわらず、WDT回路そのものが働かないときには、駆動回路がオープンになり電熱器の加熱ライン（駆動回路）そのものに電流が流れないようにしなければなりません。

モーターや電磁弁等の使用する部品については、電源が切れた場合安全側になるように設計してください。例えば、巻き上げ機の場合、電源が切れても荷物が落ちないようにブレーキがかかる駆動器を使用すなどです。電磁弁の場合も、電源が切れた際の動作を考慮してシステム設計してください。ちなみに、血圧計用の加圧ポンプは電源が切れると空気が抜ける設計になっており、故障（電源切断）した場合にはも腕を絞め続けられないようになっています。

安全設計の手法：設計段階から結果を予想して、異常事態に備える

ï フェイルセーフ

機器が、故障・破損・異常停止等が発生した場合、機器が安全側に動作/停止する設計/構造

ï フールプルーフ

人が、間違った操作をした場合、機器が危険な動作をしない構造/仕組み

















※100%安全を保証するものではなく、できる限り危険を回避すること

※上記の機構を組み込んだことによって、安全性が下がってはならない

フェイルセーフ/フールプールの事例

- ï 非常停止ボタンはB接点、なぜ？
(A接点は、ボタンを押したときにスイッチが入り、電気が流れる。B接点は、ボタンを押すと電気が切れる。)
- ï 電動裁断機の動作ボタン：なぜ、2か所？
- ï 血圧計の加圧ポンプ、電源が切れると？
対して、巻き上げ機（エレベーター）ならば
- ï パリティチェック (parity check)
- ï コンセント形状
- ï 鉄道の信号機



単相 100V	一般	 125V 15A	 125V 20A	
	接地 極付	 125V 15A	 125V 20A	
単相 200V	一般	 250V 15A	 250V 20A	 250V 30A
	接地 極付	 250V 15A	 250V 20A	 250V 30A
三相 200V	一般	 250V 15A	 250V 20A	 250V 30A
	接地 極付	 250V 15A	 250V 20A	 250V 30A

排他的操作

排他的制御とユーザー制限 - Ritsum

sip-sses.net/exclusive-control/

3. Node-REDのフロー
Appendix. Node-REDのフローファイル
1) 排他的操作のみ
2) 排他制御+ユーザー制限

1. 排他的操作

排他的操作とは、現在操作しているユーザーに操作する権限を占有させ、他のユーザーと競合しないように、他のユーザーからの操作を制限する機能を言います。R-CPSではNode-REDのダッシュボードを使ってデータの表示や操作を行いますので、複数のユーザーが同時に操作してしまう競合が発生し易くなります。Node-REDのダッシュボードを使った、排他的操作の事例をを解説します。

1-1. 機能概要

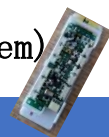
ダッシュボードを表示すると、接続元個別の識別子:msg.scoectidがサーバーであるNode-REDから付与されます。そして、ダッシュボードのスイッチやスライダーを操作すると、操作値(msg.payload)と共に、誰が操作したのかを知らせるために、msg.socketidがノードから出力されます。この機能を使い、ユーザー端末を識別し、特定の端末からの操作だけを許可するようにフローを記述します。

具体的には、グローバル変数:global.socketidを、識別のために使用します。これに設定されている値で未接続と接続中を判断します。未接続の場合には、初めに接続ボタンを押した端末のmsg.socketidが設定されて、接続中に移行します。接続中の場合には、global.socketidと等しいmsg.socketidを持つ端末しか切断ボタンを含めて操作することはできません。

以下、もう少し詳しく動作を説明します。

global.socketidの初期値には、ダミーのsocketidである"demae0000000000"を設定します。このダミーのsocketidが、global.socketidに設定されているときは、未接続状態を意味します。状態の表示は、未接続です。

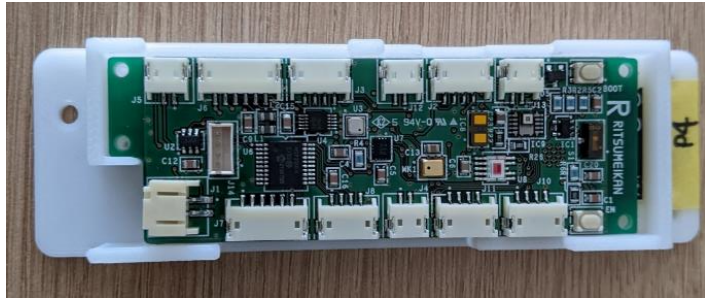
操作テスト	
ファイル保存	排他制御



実証事例	外付け センサ	MSM台数	PHD台数	エッジサーバ 台数	クラウド	備考
評価キット	—	1	1	0	—	約50セット 提供済み
地ビール醸造 (ブリューパブスタンダード)	圧力・流量・湿度・CO2	1	1	0	GCP + MG	MG社システムへ 接続済み
イチゴ栽培 (はたしょう farm)	CO2・土中水分	6	1	0	GCP	窓開閉操作実証 済み
ゆば製造 (ゆば八)	計量器・熱電対	10	4	1	GCP	エッジサーバーから 社内へ情報配信
エビ養殖 (ワボウ)	水温・DO (IV変換回路)	9	2	1	GCP	給餌機・選別機 との連動開発中
体操クラブ (おさるの森)	—	1	ノートPC (windows)	0	—	

自由なシステム構成が可能

事業化の状況



MSM-P4
 ワボウ電子で量産試作(製造供給可)
 (回路設計・制御ソフトは立命館大学作)



PDH
 ラズパイ(市販品)にNode-RED
 フロー(立命館大学作)を追加

評価キット

PDH
 (RaspberryPi 4)
 OS, Node-REDフロー
 等インストール済

↑ BTでペアリング
 設定済

R-MSM本体
 プログラムイン
 ストール済

PDH用電源

操作説明動画
<https://www.youtube.com/watch?v=JdpSdTO4XSw&t=4s>

Ritsumeikan Univ.
 Confidential



●IoT-Slerが不足
 (ハードまで解る人
 財の育成が課題)

オプションケーブル他

HDMIディスプレイ
 ケーブル



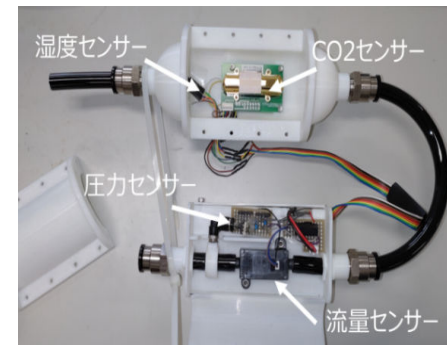
R-MSM用USB電源ケーブル

説明書



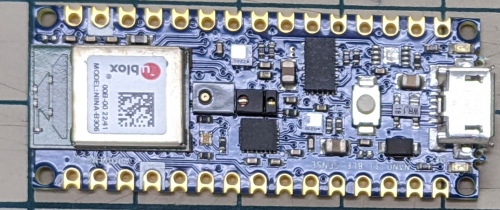
ユーザー側で準備
 ・ディスプレイ(HDMI)
 ・USBキーボード
 ・USBマウス
 これらは、セットアッ
 プ時だけに必要。稼働
 (ネットワーク接続)後
 は取り外し可

・ R-MSM用電源
 (USB電源・電池)

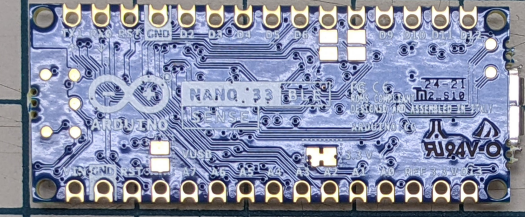
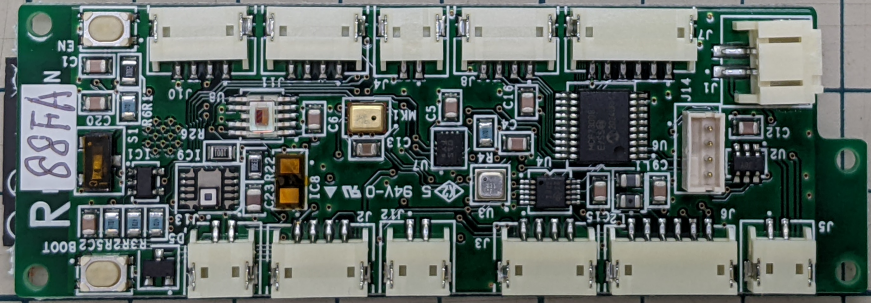


MSM+CO2センサ
 個人事業者が手作りで供
 給可(MG社の事業向け)

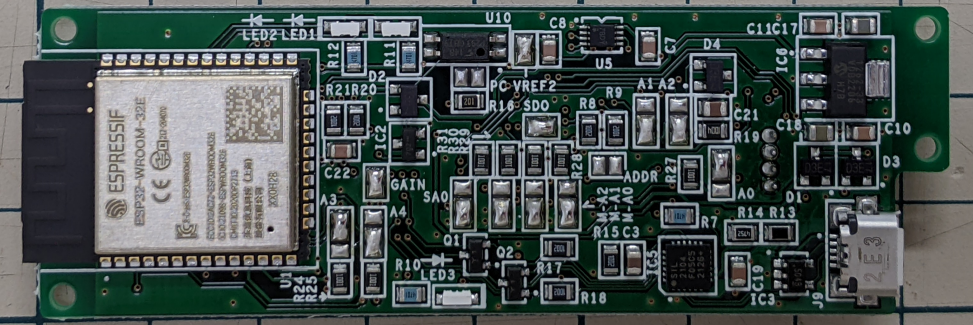
R-MSM (Multi Sensor Module) と Arduino nano BLE 33 sensor



ハガキ



ハガキ



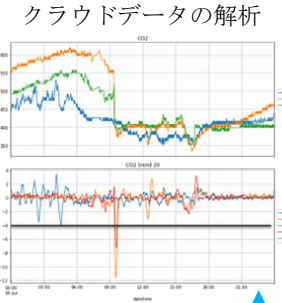
Ⅱ. いちご農家：はたしょうファーム様(2)

第2段階 クラウド活用によるデータ活用

- 1) センサの拡充(土壌水分・土壌温度試行中)
- 2) 時間場所を問わないデータ確認
- 3) 時間場所を問わない機器制御
- 4) 百葉箱と彦根気象台情報による気象情報の活用

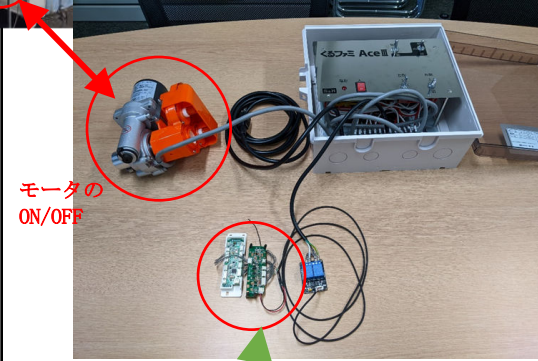
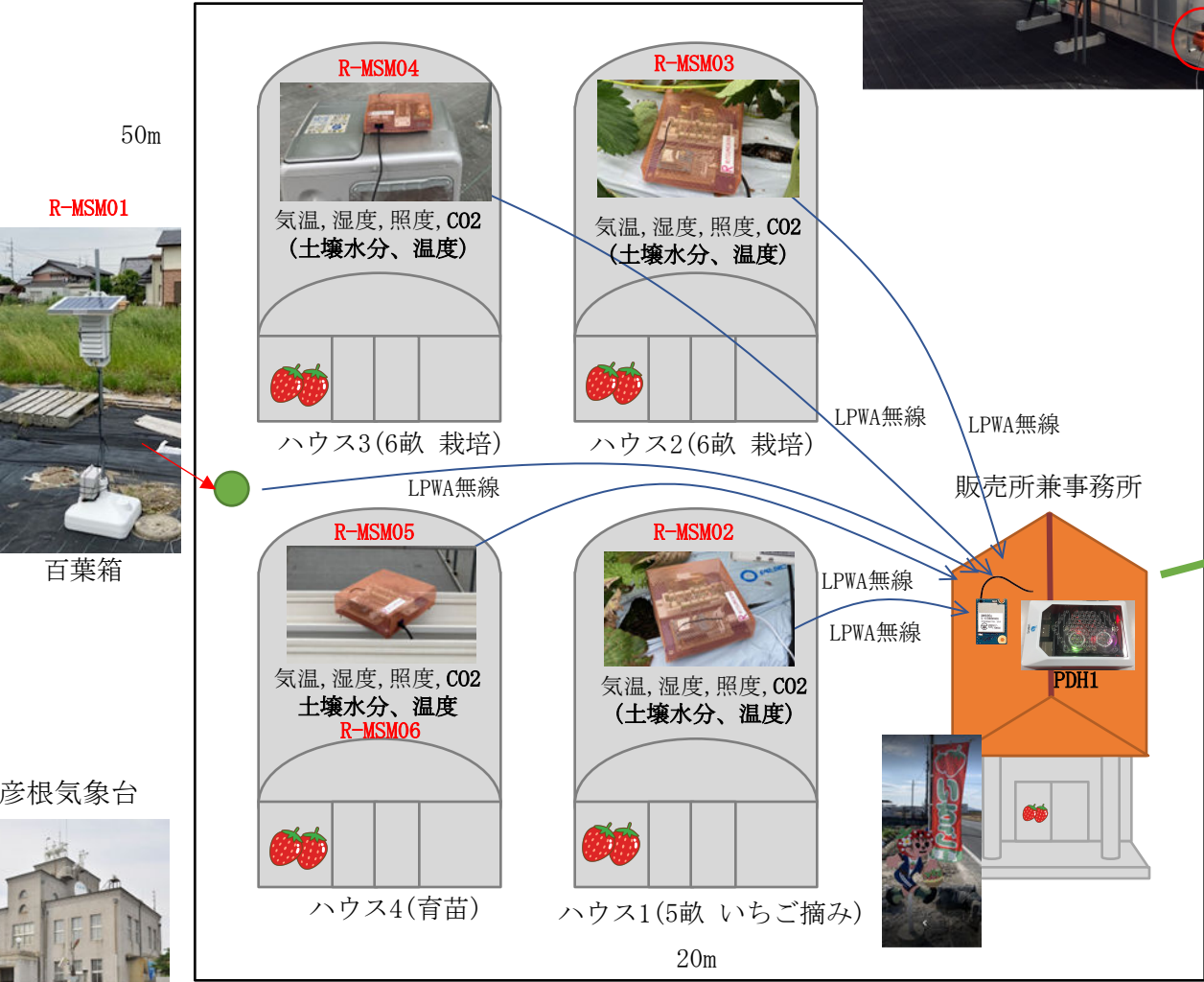


クラウド活用で
いつでも、どこでも
窓の開閉ができる!
(動作確認完。
実用化検討中)



スマホから
モータON/OFF
コマンド送信

クラウド活用で
いつでも、どこで
データ確認できる



LPWA無線

モータON/OFF
コマンド送信

1データ/分・センサで
クラウドに送信(MQTT)



My-IoTへの
データ送信
(1データ/分・センサ)

Google Cloud

ubuntu® Node-RED MySQL

再栽培ホーム

百葉箱	ハウス1	ハウス2
気温: 28.38	気温: 46.04	気温: 55.77
CO2(ADC): 408.33	CO2(ADC): 342.75	CO2(ADC): 372
湿度(511059): 69.74	湿度(511059): 498.76	湿度(511059): 25.78
土壌水分: 186.57	土壌水分: 547.54	土壌水分: 18.84
ハウス3	ハウス4	
気温: 49.81	気温: 39.28	
CO2(ADC): 1757.48	CO2(ADC): 400	
湿度(511059): 645.23	湿度(511059): 23.85	
	湿度(511059): 145.51	
	湿度(511059): 38.81	

2022/8/29 気象情報取込み(日々)

ブルーパブスタンダード



ワボウ電子



<https://youtu.be/4HHN2iha23o?t=1>

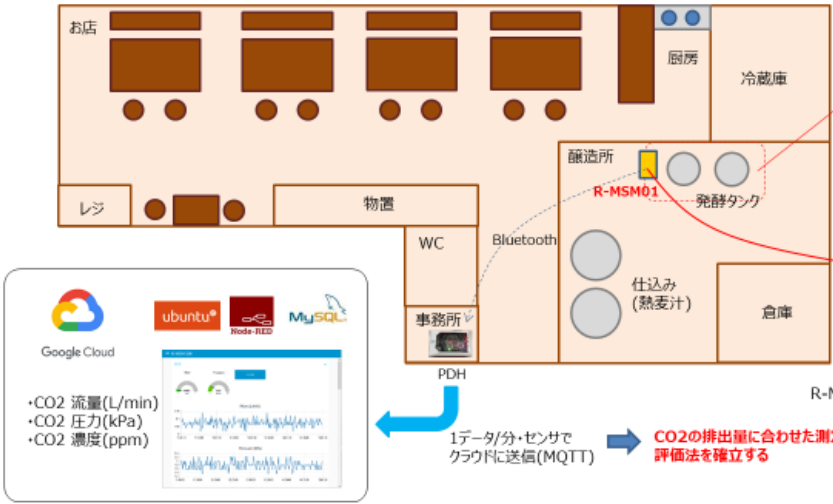
<https://youtu.be/CFp05jGx27I?t=1>



<https://sip-sses.net/r-cps-top/>
からも、アクセス可能

生産物の出来栄え予測

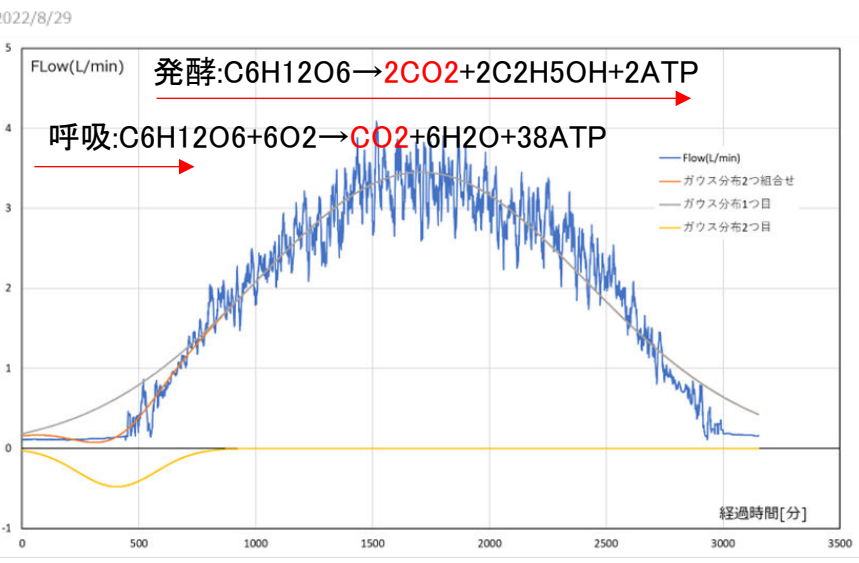
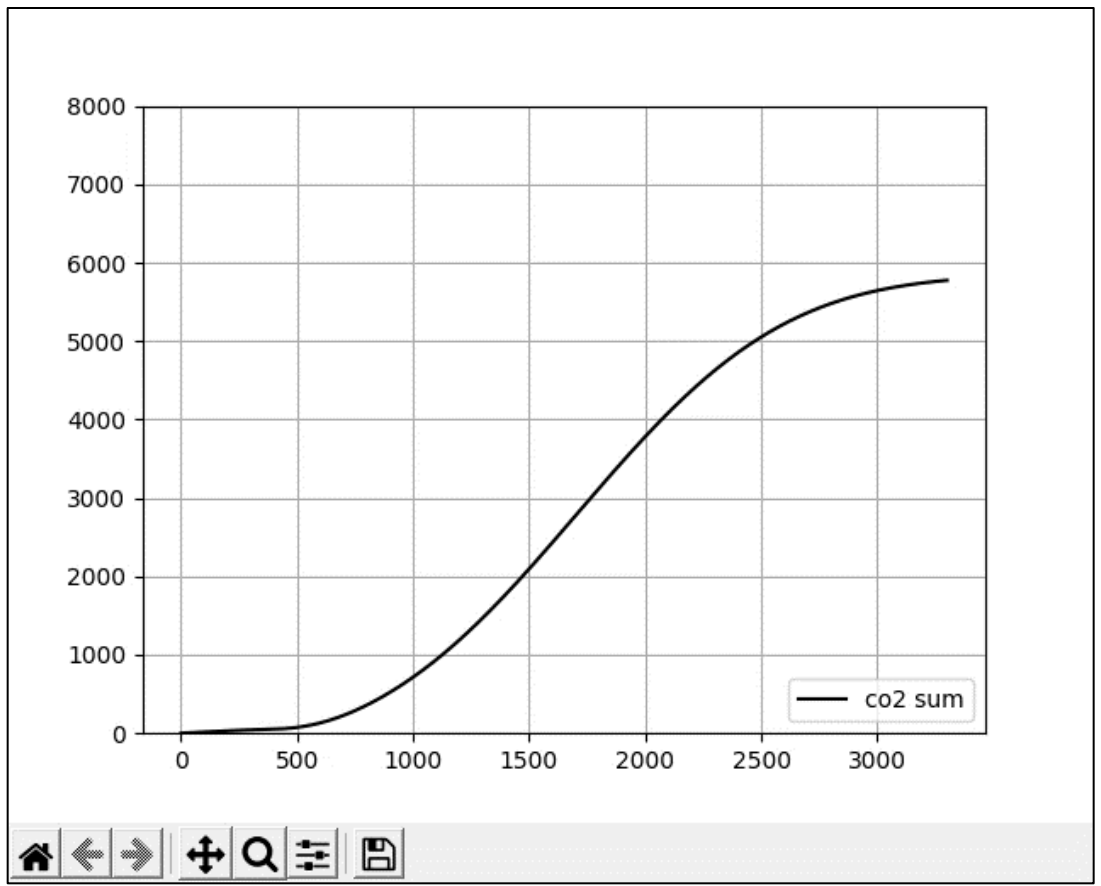
クラフトビール醸造：プリューバブ センターポイント様
1) CO2流量センサ(新外付けセンサ)への取組み
2) システムの同業他社への展開への取組み



1データ/分・センサでクラウドに送信(MQTT) → CO2の排出量に合わせた測定間隔、評価法を確立する



現在までのデータから、求めたモデル式(凹凸ガウスの積分)から、現在の発酵中のデータを基に予測

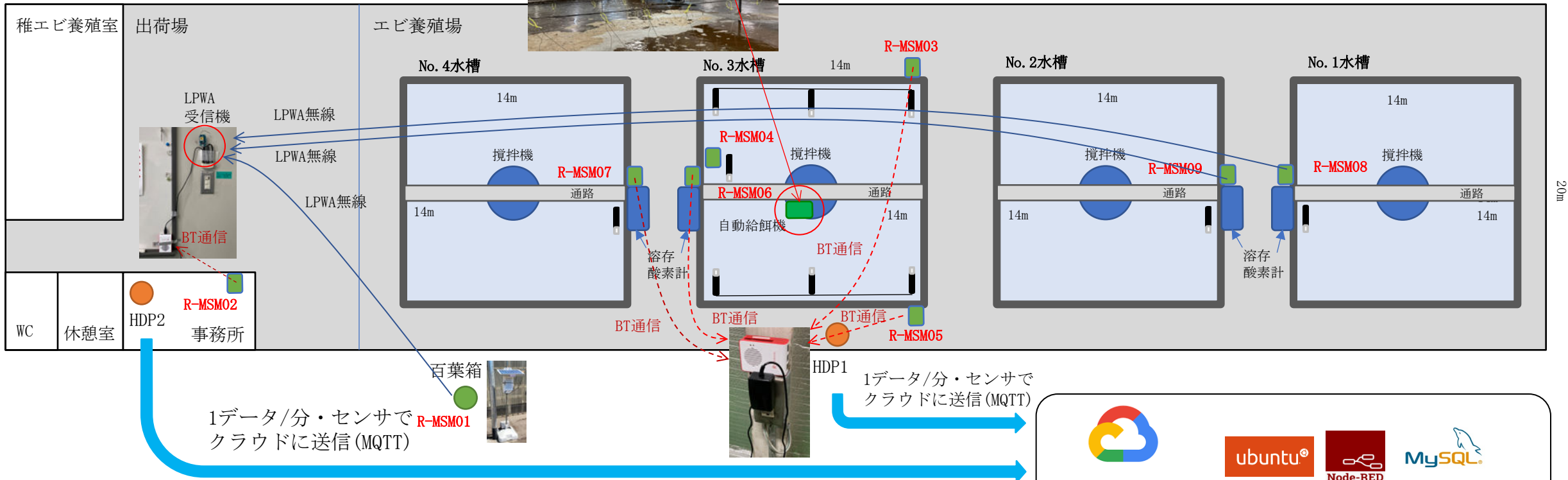


凹凸ガウス分布のパラメータ
・ 凹凸ガウス分布は、基本2つのガウス分布の和である。a0, a1と $\mu_0, \mu_1(\mu)$ と $\sigma_0, \sigma_1(\sigma)$ の6つがパラメータ

$$f(x) = a_0 \times \exp\left\{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2 \times \sigma_0^2}\right\} + a_1 \times \exp\left\{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2 \times \sigma_1^2}\right\}$$

III. エビ養殖：ワボウ産業様

- 1) 水温, 溶存酸素など新外付けセンサへの取組み
- 2) 自動給餌機の制御など機器の制御への取組み



1データ/分・センサでクラウドに送信 (MQTT)

1データ/分・センサでクラウドに送信 (MQTT)

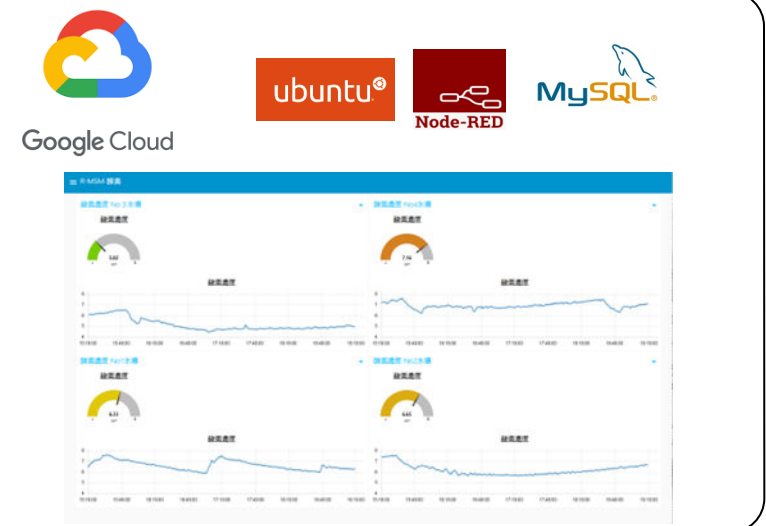
表1. R-MSM毎の取得データとシステム構成一覧

R-MSM名	取得データ	使用センサ	水槽	通信	接続HDP
R-MSM01	気温, 湿度	内蔵	—	LPWA	HDP2
R-MSM02	気温, 湿度, 気圧	内蔵	—	Bluetooth	HDP2
R-MSM03	水温×3	外付	No3水槽	Bluetooth	HDP1
R-MSM04	水温×1	外付	No3水槽	Bluetooth	HDP1
R-MSM05	水温×3	外付		Bluetooth	
R-MSM06	気温, 湿度, 溶存酸素濃度	内蔵, 外付	No3水槽	Bluetooth	HDP1
R-MSM07	水温×1, 溶存酸素濃度	外付		No4水槽	
R-MSM08	水温×1, 溶存酸素濃度	外付	No1水槽	LPWA	HDP2
R-MSM09	水温×1, 溶存酸素濃度	外付	No2水槽	LPWA	HDP2

今後の対応予定

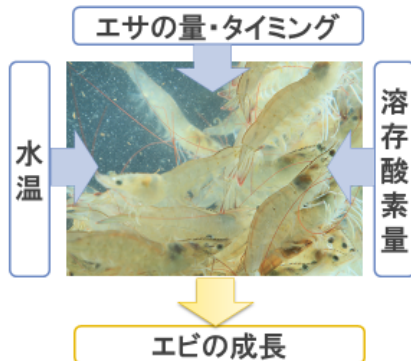
- ① 溶存酸素濃度の閾値割れ検出
⇒ ダッシュボード上の異常表示と
担当者へのメール送信
- ② 自動給餌機の制御
⇒ 溶存酸素との連携給餌
⇒ 給餌確認: モータの動作検出
⇒ 餌の残量検出
- ③ PH値の自動測定

スマホ確認



導入直後から、クラウド上の溶存酸素濃度データのスマートフォンでの確認が現場で始まっている ⇒ 溶存酸素重要

エビ養殖場の課題



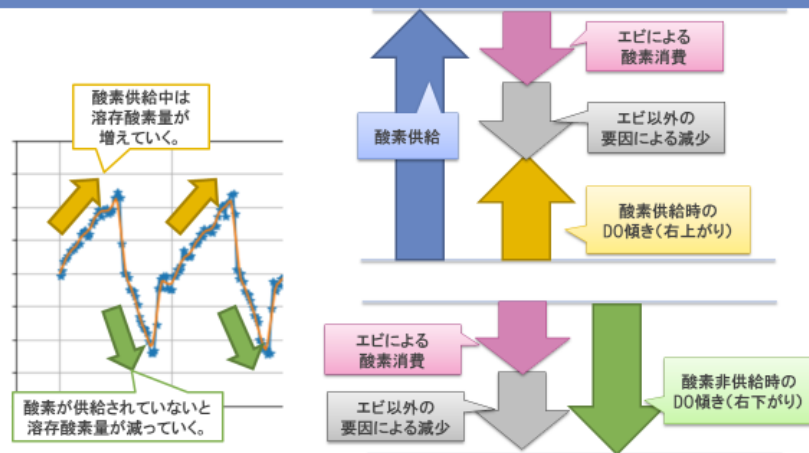
歩留まりを上げたい
→エビの状態を把握したい

今水槽に何匹エビがいるか？
エビはエサをしっかりと食べているか？

パラメータ(水温・餌・酸素供給)を変えるとどのような影響があるか？
→ 検証のためにも、上記のようなエビの状態把握が必要です。

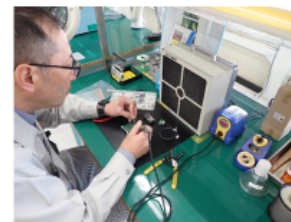
- ✓ 共食いしていないか？
- ✓ エサの食べ残しによる水質悪化
- ✓ 成長のバラつき

酸素消費量のモデル



酸素が供給されている時間と、供給されていない時間ではモデルが異なります。

自動給餌機の餌残量見える化



センサーユニットの組立



レーザー式測距センサ+
ESP32基板キット



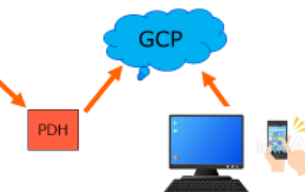
自動給餌機



センサーユニットの取付

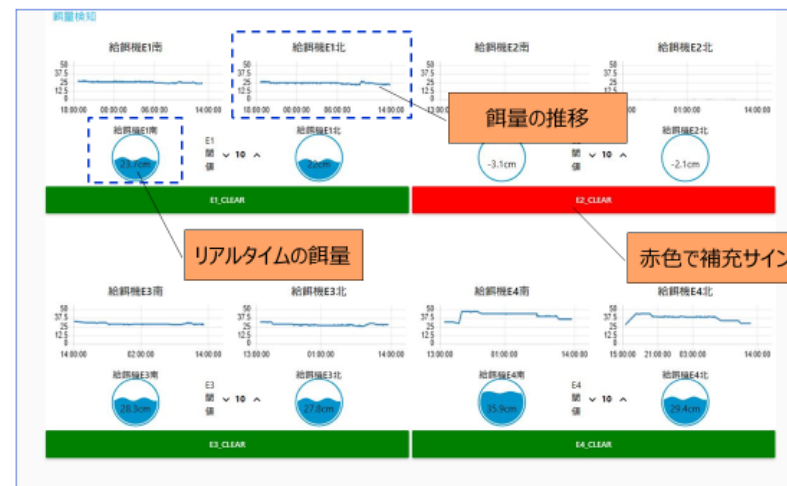


自動給餌機



パソコン or スマホ

自動給餌機の餌残量見える化



24時間いつでもパソコンやスマートフォンで餌の残量が確認できる。

- ・参加者の強い意志（業務だけではなく）
- ・会社のサポート（経営層の理解）



生産現場の課題抽出から、IoT化、そして、生産性向上へ



3Dプリンタを使った造形実習



R-CPSを中心に、ロボット、PLC、自動機、安全機器などを配した模擬工場



おわり