

パン醗酵モニタシステムの開発

佐藤 証¹

概要:

フランスパンの代表である気泡が多数開いた本格的なバゲットを家庭で焼くことを目的に, 各種センサを導入した醗酵モニタシステムを開発した. モニタ装置に実装した Wi-Fi 機能を有したマイコンは, パン生地 of 醗酵中に発生するアルコールと二酸化炭素の濃度や, レーザ距離センサで測定した生地 of ふくらみ等のデータを Raspberry Pi サーバに送信し, ユーザはそれらをスマートフォン等でモニタすることができる. 温度や時間, 材料の配合比の変化 of 醗酵への影響を調べると共に, 焼き上がりの違いを比較した. 距離センサのデータから生地 of ふくらみがピークを迎える最適な醗酵時間が把握でき, またアルコールと二酸化炭素濃度からイーストの活動が弱まるとされる低温時でも時間が経過すると, 常温を越える活発な醗酵が行われていることも明らかとなった.

Development of Bread Fermentation Monitoring System

AKASHI SATOH¹

1. はじめに

昨今のライフスタイルの変化により生活自宅で過ごす時間が増えたことで, 手間暇をかけたパン作りがブームとなっている. パンの種類は強力粉を使うソフト系と, 中力粉を使うハード系に大きく分けられる. 食パンや菓子パンはソフト系で, 強力粉による強いグルテンが形成されるため, キメが細かく柔らかくモチモチとした食感になる. 一方, ハード系の代表であるフランスパンのバゲットは, 外はパリッと固く内部はサクッと軽い. バゲットの材料は小麦粉, イースト(酵母), 塩とシンプルであるが作り手によって味も風味も千差万別である. これは日本人が主食である白米のブランドや炊飯器に大きなこだわりを持って炊きあがりの味を競うのにも通じる.

生クリームやバター等をたっぷりを使用し, しっとりとした触感の高級食パンが人気を博していたが, これらは正統派のパンではなくむしろ菓子パンの部類に近く, 一時的なブームの様相もある. バゲットの最大の特徴は, 図1のようにハチの巣状に多数空いた気泡である. これに対して図2の国内大手製パン会社がスーパー等で販売しているものは, 外観こそそれらしいものの柔らかく, きめは細かくもっちりとしておりバゲットとは呼び難い. また大きな気泡を持つ本格的なバゲットを提供するパン屋はまだ多くなく, また家庭で焼くことも非常に難しい.

パン作りの主要な工程は, 醗酵, 成形, 焼成であり, その中でも醗酵は気泡だけでなく, 味や風味にも大きく影響するため特に重要である. パンの教科書では醗酵終了の目安は例外なく「2 倍に膨らんだら」記述されるが, 刻々と状態が変化する生

地の“2 倍”は非常にあいまいな指針と言わざるを得ない.

我々は, 無線マイコンやセンサ等の IoT 技術を用いて, 水耕栽培や養蜂など動植物の状態をモニタリングする研究を行ってきた[1]-[5]. 日本におけるフランスパンの草分け的存在で「パンの神様」と呼ばれたフィリップ・ビゴ氏が「パンは生き物」と語るように[6], パン生地は環境に応じたイーストの活動により状態が変化していく. そこで, その状態を感覚ではなく, センサのデータで把握するシステムを構築し, その有用性を検証する.



図1 バゲットの断面



図2 大手製パン会社のバゲット

¹ 電気通信大学
University of Electro-Communications

2. バゲットの焼き方

以下では実験で行うバゲットの焼き方の手順を示す。基本的な手順に比べてもかなり簡略化しているが、これは醗酵状態のデータに影響する人手の要因をできるだけ少なくするためである。表1に示したバゲットの材料は、家庭の小さなオーブンで焼くときの2本分である。比率は、小麦粉の量を100としたときの値である。小麦粉はバゲット用の準強力粉と呼ばれるもので、蛋白質が10.7%の定番のリスドオル[7]を基本に用いた。なお、食パンや菓子パンに用いる強力粉の蛋白質は12%、中力粉は10%、料理に用いる薄力粉は7%程度である。

パン酵母には定番のサフ社のインスタントドライイーストの赤[8]を使用した。モルトや砂糖を溶かした少量の水にイーストを加えて活性化させることも多いが、ここではイーストだけとした。また、塩はイーストが嫌い、またグルテンを引き締めてしまうので、後から入れることも多いが、ここでは簡単のため全ての材料を一度に混ぜるストレート法を採用している。水は水道水と、超硬水のコントレックスを6:4の割合で混ぜている。バゲットは小麦粉100gに対して水70gの加水率70で作るのが基本で、水が少ないと気泡が小さくなり、逆に多いと気泡は大きいが生地がダレて潰れてしまう。

パン屋では短時間で醗酵させるためにホイロと呼ばれる醗酵器を用いて、温度30℃前後、湿度70~80%の安定した環境で一次醗酵と二次醗酵を合わせて90~120分程度醗酵させる。しかし醗酵時間は長いほど生地が熟成が進み、風味が増す。これは、酵母が醗酵の過程で蛋白質をアミノ酸に分解するためである。そこで、冷蔵庫内の5~9℃程度の温度で8時間以上醗酵させるオーバーナイト法を基本とする。パンを膨らませるには、通常しっかりと捏ねて薄いグルテン膜を形成する必要があるが、オーバーナイト法では生地に自然に伸展性と弾力が出るため、さほど捏ねる必要がないのも大きな特徴である。

焼成の温度は業務用オーブンでは300℃で一気に膨らませた後、220℃程度まで下げるが、一般的な家庭用オーブンではそこまで温度が上がらないため、ここでは250℃一定とした。以下に手順を示す。

表1 バゲットの材料の分量

材料	分量	比率
準強力粉(蛋白質10.7%)	200g	100
ドライイースト(赤サフ)	0.6g	0.3
塩	4g	2
硬水	140g	70

- ① ボールに表1の材料を全て入れる。
- ② 5分ほどヘラでよく混ぜる。
- ③ 容器に移して室温で一次醗酵。(60分)
- ④ 野菜室に入れて二次醗酵。(12時間以上)
- ⑤ 容器から出した生地に小麦粉をふるい半分にカット。
- ⑥ 生地をまるめてラップでくるんで三次醗酵。(40分)
- ⑦ 生地を綿棒等で長方形に伸ばす。
- ⑧ 生地を三つ折りにして成形する。

- ⑨ 形が保ようにキャンバス生地に挟んで最終醗酵。(40分)
- ⑩ 剃刀で膨らむのを助ける切れ込み(クープ)を入れる。
- ⑪ 250℃に温め、霧吹きをかけたオーブンで25分焼く。
- ⑫ 完成。



図3 バゲット作りの手順

ーバに送信した。サーバが受信したデータは、フローベースプログラミング環境の Node-RED [17]を用いて、スマートフォンで遠隔モニタすることが可能である。図 6 に Node-RED の制御フロー図を、図 7 にそのモニタ画面を示す。測定時以外の電力を削減するため、ESP32 は Deep Sleep モードに入れているが、MH-Z19C はモバイルバッテリーから直接 5V を供給しており、Deep Sleep 時も測定用の赤外線を放出している。また MQ-3 のヒーターも常時オン状態にある。そのため、3,400mAh のバッテリーでも駆動時間は 10 時間ほどと短い。

ESP32-mini と温湿度センサ HTU21D バッテリーは、容器の木製の蓋の上部に取り付け、蓋にドリルで穴を空けてケーブルを通して裏面の他のセンサと接続した。サーミスタは生地の中に挿入して温度を測定した。なお、冷蔵庫内から外部への Wi-Fi 通信は良好であった。

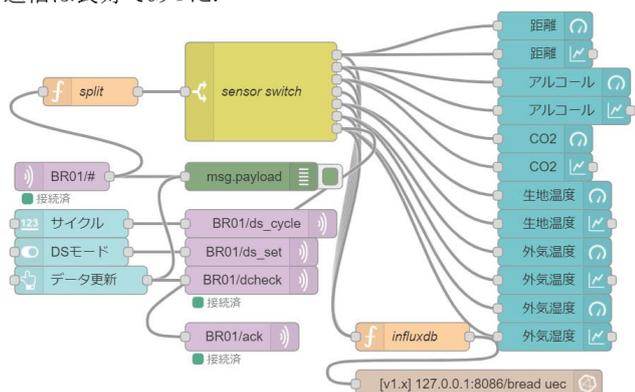


図 6 醗酵モニタの Node-RED フロー図



図 7 醗酵モニタのスマートフォン画面

5. 醗酵実験と考察

オーバーナイト法では低温で醗酵を進めるが、温度の違いによる影響を調べるため、まず室温で醗酵を行った。図 8 に室内で 14 時間発酵させたときの各センサのデータを、また図 9 に時間経過による生地のふくらみの変化を示す。センサとは別に用意した市販の温度計では、室温は 22℃ 台で一日安定しており、生地温度は室温と同じであった。蓋の表に取り付けた温湿度センサ HTU21D の外気温度は約 27℃ となっているが、ESP32 に直付けしており、常時電力が供給されているアルコール濃度センサ MQ-3 や、二酸化炭素濃度センサ MH-Z19C のヒーターの熱が配線を伝わって高くなってしまったものと見られる。

MQ-3 の測定範囲は 0.05~10mg/L で、濃度によって変化

する抵抗にかかる電圧を ESP32 の ADC で測定した。その値の、この実験における上限は 2,000 強であった。また、MH-Z19C の測定範囲は 400~5,000ppm である。これらが、イーストの増殖と活発な醗酵と呼吸により、アルコール濃度は約 3 時間、二酸化炭素濃度は約 1 時間半で上限値に達してしまった。そこで毎時、蓋を開けて中の空気を入れ替える換気作業を行った。しかし、5~10 分ほどで再び上限値に達してしまい、その繰り返しによりグラフがのこぎり状になっている。湿度はノイズが大きいように見えるが、換気の時刻で上がっていることから、HTU21D が載った蓋を覆うようにして手でしばらく持ち上げたことによる影響と考えられる。

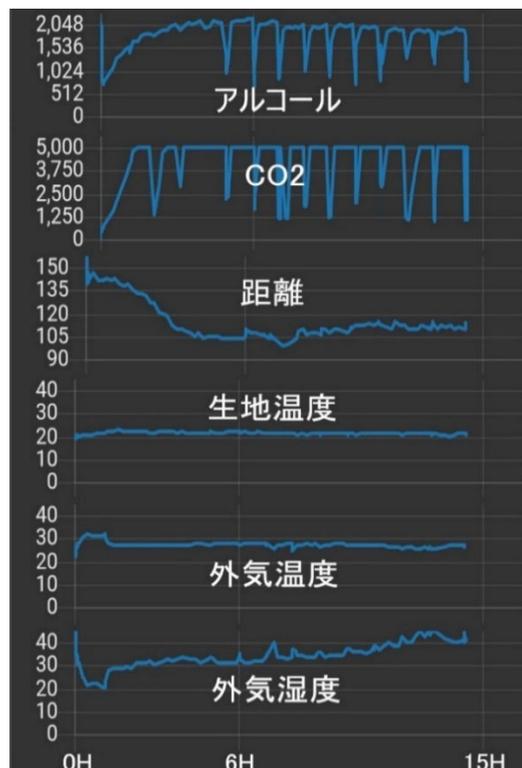


図 8 室内での醗酵のデータ



図 9 室内での醗酵の生地のふくらみ

蓋と生地の距離は、初期値の 140mm から、最も膨らんだときに 105mm (99mm まで近付いているのは、空気の入れ替えで蓋を開けた際にサーミスタが生地を引っ張った影響) まで縮まっている。瓶が空の時の距離は 150mm であったので、生地の厚さは 10mm から 45mm と 4 倍以上になっていることがわかる。初

期状態は生地の上に凹凸がかなりあるものの、目測でも4倍程度に膨らんでおり、どの時点での生地を基準とするかにもよるが、醗酵を見極める「2倍に膨らんだら」という表現はかなり大雑把であると言えよう。

距離センサの値で、ふくらみが最大となった4時間後、潰れ始めたと見られる6時間後、そして最後の14時間後の3つの生地を用い、2章の手法で焼成まで行って気泡を比較した。パンの長さは24~26cmであった。なお、4時間後と6時間後の生地は、醗酵センサの瓶ではなく、タッパー内で同時に醗酵を進めていたものを用いている。気泡の出来はいずれも本格的なバゲットには程遠いが、4時間が最もふくらみがよかつ軽く、成形もきれいにできた。6時間も軽さは同程度であるが、生地がややゆるく形がいびつになってしまっている。14時間のもは写真ではわかりにくいですが明らかに過醗酵であり、パンという食感ではなく、ずっしりとしたナンのような感じであった。



図10 室内で発酵時間を変えて焼いたバゲット

図11は1時間の室温での一次醗酵の後、冷蔵庫内で生地発酵させたオーバーナイト法の15時間(1H~16H)各センサのデータである、また、図12はふくらみを確認するために装置を1時間毎に冷蔵庫から出して撮影したものである。なお、庫内温度は5.5~7.0と安定していたが、撮影と換気のために装置を外に出したため、外気温度と外気湿度のグラフは大きく変動している。

図8の室温での醗酵時のグラフでは、アルコール濃度と二酸化炭素濃度は、瓶内の換気から10分ほどで再び測定範囲の上限に戻っていたが、冷蔵庫内では1時間でも上限に達していない。室温下でのアルコール濃度センサの上限値は2,000強であったが、ここでは低温の影響で半分の1,000強となっている。なお、真ん中を過ぎあたりで濃度のグラフが乱れているが、これはバッテリー切れによるものである。

蓋からの生地の距離も初期値の140mmから128mm、つまり生地の厚さは10mmから22mmと2倍強であり、は室内での醗酵の最大値45mmの半分でしかない。これは、その後48時間まで発酵を継続した図13から、まだ生地が膨らんでいる途中であったことがわかる。距離は最短で105mm、つまり室温と同じ45mmまで膨らんでおり、このとき頻繁に換気をして、図14のように、アルコールと二酸化炭素の濃度は3~4分で上限値に達してしまっている。つまり低温ではイーストの増殖に時間がかかるものの、一旦増殖すると低温でも活発に醗酵や呼吸が行われることがわかる。

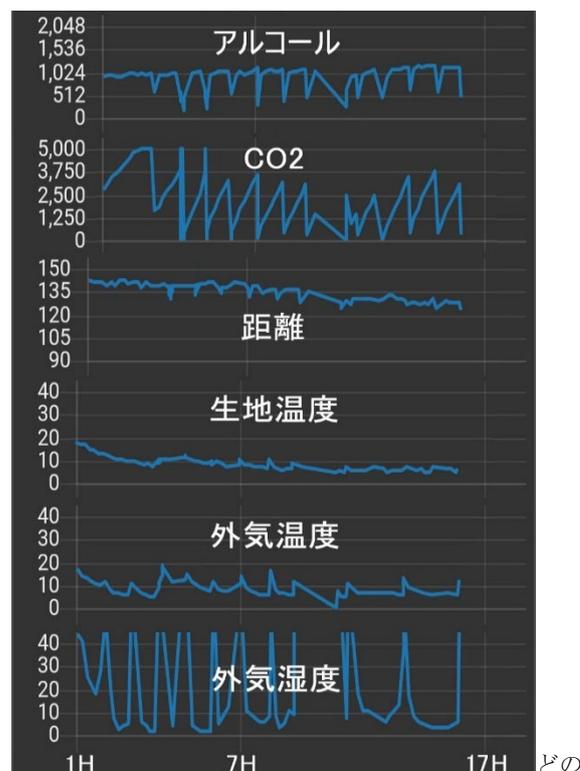


図11 オーバーナイト法の醗酵データ

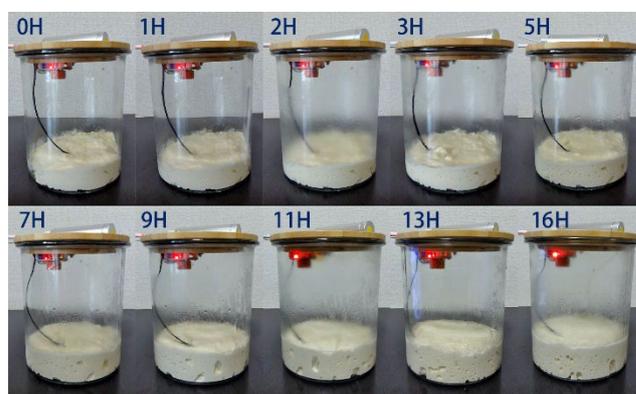


図12 冷蔵庫内での醗酵の生地のふくらみ

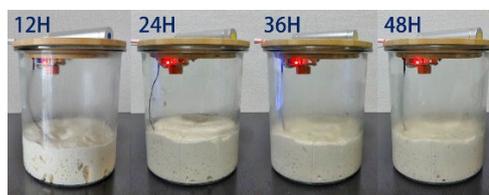


図13 冷蔵庫内醗酵の12~48時間後のふくらみ

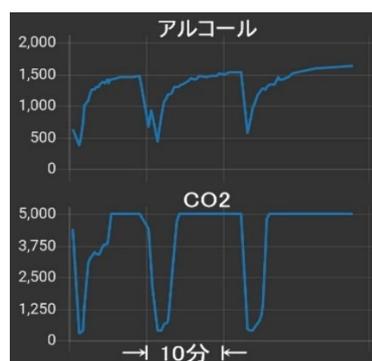


図14 アルコールと二酸化炭素の急激な発生

オーバーナイト法では通常、タッパー等の容器に生地を密閉した状態で冷蔵庫に入れて長時間醗酵させるため、酸素を使わないアルコール醗酵が大きなウェイトを占めると考えられる。しかし、今回の実験ではアルコールと二酸化炭素のセンサで醗酵の活発さをモニターする予定であったが、センサの測定範囲すぐに超えてしまったため、1時間毎に換気をする事となった。そのため、瓶の蓋を開けた直後の二酸化炭素の急峻な立ち上がりは、アルコール醗酵の3倍の二酸化炭素を生成する呼吸の影響も大きいと考えられる。

図15はオーバーナイト法で12~36時間二次醗酵を行ったときのバゲットの外観と断面図である。12時間はまだ醗酵が活性化している途中であり、ふくらみが足りなかった。また36時間のは過醗酵で、生地がややベタつき、仕上がりが重かった。その中間の24時間醗酵は、3本の中で一番気泡が大きく軽かった。図10の室内醗酵で一番出来の良かった4時間醗酵も同様に、生地のふくらみがちょうどピークを迎えた頃のもので、その後その高さを維持し続けるものの、その初期のタイミングを見極めることが必要と考えられる。低温化ではイーストの活動が弱まり、醗酵は常に弱いものと考えていたが、図14からもわかるように、イーストが長時間かけて増殖した後、全体として非常に活発であることが分かった。

ところで、加水率を多くしたり、薄力粉を混ぜて蛋白質の割



図15 オーバーナイト法で醗酵時間を変えたバゲット



図16 オーバーナイト法で加水率を変えたバゲット



図17 オーバーナイト法で蛋白質の比率を変えたバゲット

合を少なくすることで、気泡を大きくし生地を軽く仕上げられることが知られている。順強力粉 100g に対して水 70g が標準であるが、これを図16のように75g, 80gと増やすと気泡が大きくなっていくことがわかる。また、図17では小麦粉の蛋白質の比率を変えており、12%の強力粉ではきめが細かく弾力が強く、準強力粉の10.7%よりも少ない10%の中力粉では穴が広がり軽いバゲットとなった。しかしながら、気泡が大きくなる片面生地がゆるくなり、成形が難しく、他よりも平べったい感じになってしまった。加水80gと蛋白質10%のもの断面積が大きいのはそのためである。

バゲットの材料はシンプルながら、このようにわずかな条件の違いでも大きな影響が表れる。今回はそれらの要因による変化の一部ではあるが、定量評価にセンサの利用が有効であることが示された。

6. むすび

本稿では、軽くて大きな穴が多数空いた本格的なバゲットを焼くことを目的に、パン生地の醗酵中に発生するアルコールと二酸化炭素の濃度や生地のふくらみを、センサで計測するシステムを製作し、条件を変えたときの焼き上がりの違いを比較した。

温度は醗酵への影響が大きい、距離センサで適切な醗酵終了のタイミングを見極めることができた。またオーバーナイト法における冷蔵庫内の温度は安定している、醗酵の進行状態は時間で予測することも可能である。しかし、一次醗酵や最終醗酵における室温は、季節や天候によって大きく変化する。しかし、本実験で用いた醗酵モニタ装置を一般の過程で利用することは困難である。また本来は夜中に放置するオーバーナイト法で、1時間毎に濃度測定のために換気を行うというも本末店頭である。そこで、温度変化や材料の配合の違いによる醗酵の進行パターンを事前に複数取得し、温度データから醗酵状態を予測し、ユーザにアドバイスをを行うようなシステムの構築が今後の課題である。

オーバーナイト法は低温でゆっくり醗酵させることでグルテンがつながるので、強く捏ねる必要がないと言われる。しかし今回の簡略化した手順の生地は、大きな気泡を作るのに必要なゴム風船のように薄く伸びる強いグルテンができていないようであった。一次醗酵においては、今回のように全ての材料を一度に混ぜるストレート法他、後から生地に塩やイーストを加えるオートリーズ法、分量の一部を捏ねて醗酵させた後で全ての材料を混ぜ合わせる中種法など、様々な方法がある。そのような捏ね方による、醗酵過程のデータや焼き上がりの違いについても検討を進めていきたい。

気泡の量や食感は目視等による主観的な評価を行ったが、手順や材料の配合や種類が変わったときに、それらがどう働いたかを客観的に評価できるよう、画像解析等を含めた定量的な評価手法の開発も重要となるであろう。

近年の外出から中食へのシフトや、多様化する個人の食のニーズ、また健康志向の高まり等から、パンだけでなく、家庭で

の趣味としての料理やお菓子作りがブームとなっている。書籍やネットでは作り方について多種多様な情報であふれているが、失敗や成功を科学的に検討するような取り組みは見当たらない。IoT 技術を用いたキッチン家電も製品化されているが、ネットに接続してレシピをダウンロードしたり、ユーザに指示を出したりというものにとどまっている。かつては勘や経験だけに頼っていた農業に、IoT 技術の導入によるスマート農業という成長産業が生まれたように、勘と経験の料理にも IoT 技術で新しい世界が広がることを期待し、“スマートクッキング”の研究をさらに進めていく予定である。

参考文献

- [1] Satoh: A Hydroponic Planter System to Enable an Urban Agriculture Service Industry, IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2018), OS-ICE(1)-1, Oct. 2018.
- [2] 佐藤証研究室: 都市型スマート農業 ～楽しむ農業を都市に広げる水耕栽培システム, 入手先 <<https://satoh.cs.uec.ac.jp/ja/research/hydroponics/index.html>> (参照 2022-05-01).
- [3] 吉竹隆也, 佐藤証: 小型・省電力センサによるスマート養蜂システム, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2021) シンポジウム, 4H-2, pp.838-843, 2021年6月.
- [4] 寺田充樹, 佐藤証: 養蜂のための外敵検出カメラシステムの開発, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2021) シンポジウム, 4H-1, pp.833-837, 2021年6月.
- [5] 佐藤証研究室: スマート都市養蜂 ～ミツバチとともに自然あふれる都市空間を創造, 入手先 <<https://satoh.cs.uec.ac.jp/ja/research/bee/index.html>> (参照 2022-05-01).
- [6] フィリップ・ビゴ, “フィリップ・ビゴのパン”, 柴田書店, ISBN 978-4-388-05980-5, 2005.
- [7] 日清製粉: パン用粉リストオル, 入手先 <<https://www.nisshin-seifun-welna.com/index/nisshin/wb/detail/03.html>> (参照 2022-05-01)
- [8] Saf-instant: Professional Beker, <<https://saf-instant.com/en/professional/>> (参照 2022-05-01).
- [9] Contrex: ナチュラルミネラルウォーター、「コントレックス」, 入手先 <<https://www.contrex.jp/>> (参照 2022-05-01).
- [10]Espressif Systems Co., Ltd.: ESP32, 入手先 <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>> (参照 2022-05-01).
- [11]Measurement Specialties, Inc.: TU21D Digital High Accuracy RH/T Sensor, 入手先 <<https://www.te.com/usa-en/product-CAT-HSC0004.html>> (参照 2022-05-01)
- [12]Winsen: MH-Z19C NDIR CO2 Sensor for HVAC and IAQ, 入手先 <<https://www.winsen-sensor.com/sensors/co2-sensor/mh-z19c.html>> (参照 2022-05-01)
- [13]Hanwai Electronics Co. Ltd.: TECHNICAL DATA MQ-3 GAS SENSOR, 入手先 <<https://www.waveshare.com/w/upload/6/6b/MQ-3.pdf>> (参照 2022-05-01).
- [14]MQ-3 Gas Sensor, 入手先 <https://www.waveshare.com/wiki/MQ-3_Gas_Sensor> (参照 2022-05-01).
- [15]STMicroelectronics NV: VL53L0X World’s smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor Datasheet - production dataMQ-3 Gas Sensor, 入手先 <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>> (参照 2022-05-01).
- [16]Home Assistant, Inc.: Home Assistant, 入手先 <<https://www.home-assistant.io/>> (参照 2022-05-01).
- [17]OpenJS Foundation: Node-RED Low-code programming for event-driven applications, 入手先 <<https://nodered.org/>> (参照 2022-05-01).