

陶磁器分野における AI、IoT 活用技術の開発(その1)

陶磁器科 稲尾 恭敬、吉田 英樹

要約

焼成炉内温度分布のリアルタイム可視化技術を確立するため、本研究では 0.1m³ ガス焼成炉内の上段、中段、下段の3点に K 型熱電対を挿入し、接続したラズベリーパイにて多点温度データを蓄積することが出来た。また蓄積した多点温度データは遠隔にてパソコンやスマートフォンでリアルタイムに閲覧できることを確認した。

キーワード：ガス焼成炉、温度センサー、熱電対、ラズベリーパイ、リアルタイム可視化

1. はじめに

本県の陶磁器産地は量産技術に秀でており、多くの窯元が大型のガス焼成炉で陶磁器を生産している。

陶磁器製品の近年の市場においては、大量生産から多品種少量生産の需要が高まっているため、様々な形状やサイズの製品を安定して生産する必要がある。そのためには、メーカー各社が保有する焼成炉特有の炉内温度分布を把握したうえで、最適な窯積みをすることも重要な要素である。特に、窯が大型になるほど製品の積み方や積載量によって窯の中心温度が上がりにくくなることが経験的に知られており、結果として製品品質にばらつきが生じる可能性がある。このため、最適な窯積み方法を経験的に熟知している熟練技術者の存在が不可欠であるが、図1に示す長崎県の窯業・土石製品製造業の従業者数を年度別に示したグラフ¹⁾によると、H17年度の4,097人に対しR2年度は2,715人と34%減少しており、熟練技術者も同様の傾向にあると考えられる。

そこで近年、多品種少量生産技術や熟練技術の伝承における課題を解決する一つの手段として、AI(人工知能)、IoT(モノのインターネット化によるデータ収集)が注目されている。IoTを窯業に活用した例として、東日本電信電話が、

伝統技術と文化の継承を目的として、登り窯での焼成の様子(ライブ映像やIoTセンサーで計測した窯の内部温度変化)を、PCやスマートフォンを通してリアルタイムに閲覧、陶芸の仮想体験ができる仕組みがある²⁾。

本研究では、陶磁器製造において重要な焼成プロセスに着目し、ガス焼成炉に適用可能なIoT活用技術の開発を行う。具体的には、IoT機器に接続された温度センサーをガス焼成炉に設置し、炉内温度をリアルタイムに可視化することでガス焼成炉内の温度分布を把握し、焼成歩留りとの関係を明らかにすることで生産の安定化を図ることを目的とする。

本年度は、このIoT機器に接続された温度センサーを用いて0.1m³ガス焼成炉の多チャンネル測定を試みた。

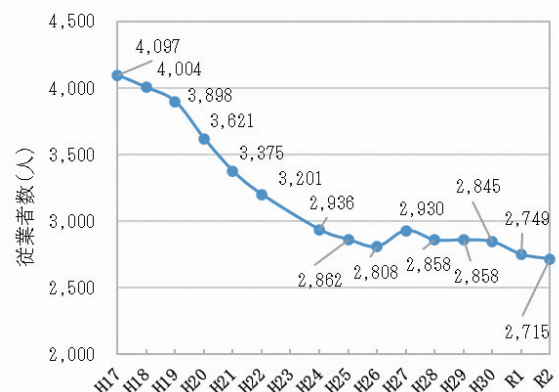


図1 長崎県の窯業・土石製品製造業 従業者数合計

2. 実験方法

2.1 温度、CO ガス濃度測定機材

図2(上)は、本試験で使用したIoTセンサーを示す。福岡県工業技術センターから提供頂いたIoT支援キットをインストールした小型コンピュータ「ラズベリーパイ (Pi-4gb-Starter-Kit)」に、温度センサーモジュール及びウェブカメラを接続した。温度センサーは K型熱電対を使用した。

COガス濃度の測定は、図2(下)に示すCOガスセンサー(理研機器製 RI-557)を使用し、ラズベリーパイに接続したウェブカメラでその数



図2 IoTセンサー(上)とCOガスセンサー(下)

値を読み取った。温度センサーやCOガスセンサーから取得したデータは、PCやタブレットなどのウェブブラウザからNode-REDで生成したウェブページにアクセスすることで、リアルタイムに取得データを閲覧できるか確認した。

2.2 0.1m³ ガス焼成炉における温度計測試験

0.1m³ ガス焼成炉の内部を図3に示す。K型熱電対を焼成炉内の上段、中段、下段に設置し、ラズベリーパイにて温度データの蓄積と、蓄積した温度データを遠隔でリアルタイムに動作確認した。さらに、共通熱履歴センサーリファサーモ (Type M)³⁾以下、リファサーモ)を9箇所(上段3箇所、中段3箇所、下段3箇所)に設置して温度分布の測定を同時に行った。0.1m³ ガス焼成炉での温度計測試験はSK9 (1280℃)還元焼成で行った。



図3 0.1m³ ガス焼成炉内の様子

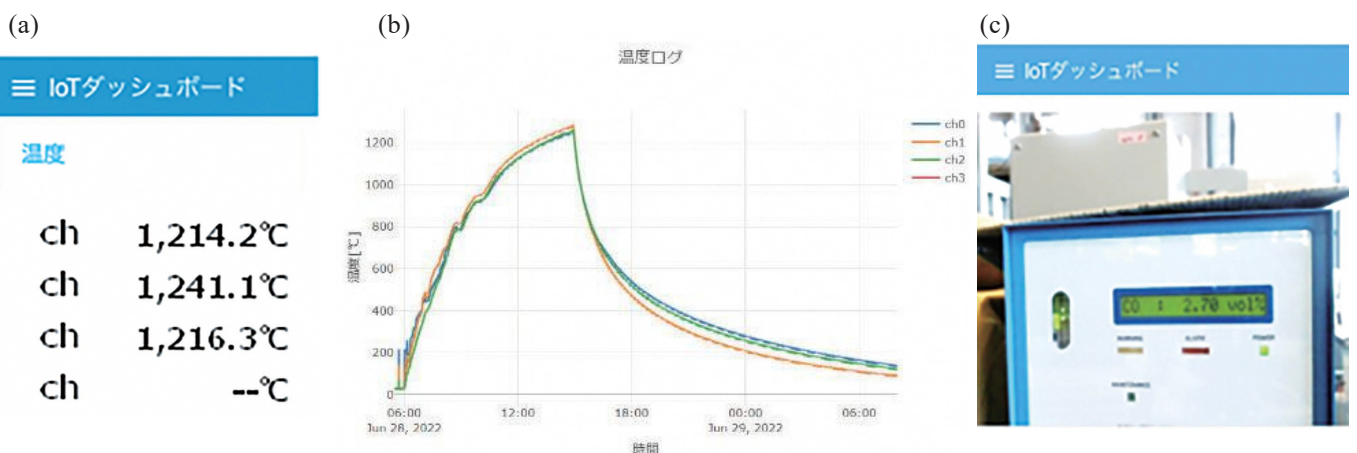


図4 Node-REDページ画面 ((a)リアルタイム表示画面、(b)温度グラフ、(c)カメラ画像)

3. 結果と考察

3.1 温度、CO ガス濃度測定機材

図4は、PCのウェブブラウザからNode-REDで生成したページにアクセスした際に表示される、温度のリアルタイム表示画面及び経時変化グラフ、COガスセンサーのCO濃度表示を撮影したカメラ画像を示す。この画面はPC以外にもタブレット端末、スマートフォン、いずれのウェブブラウザからも遠隔でリアルタイムに閲覧することができた。

3.2 0.1m³ ガス焼成炉における温度計測試験

リファサーモによる温度分布測定結果及び熱電対測定位置における最高温度を図5に示す。

リファサーモ指示温度は、上段温度、中段温

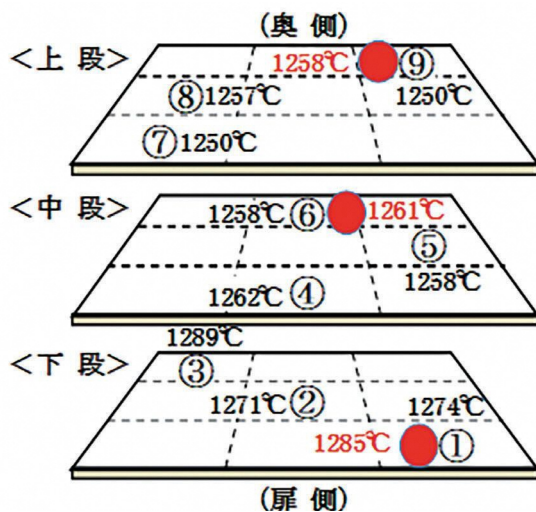


図5 0.1m³ガス焼成炉の温度計測結果及び熱電対測定位置における最高温度
①～⑨:リファサーモ熱履歴温度
●:熱電対最高温度

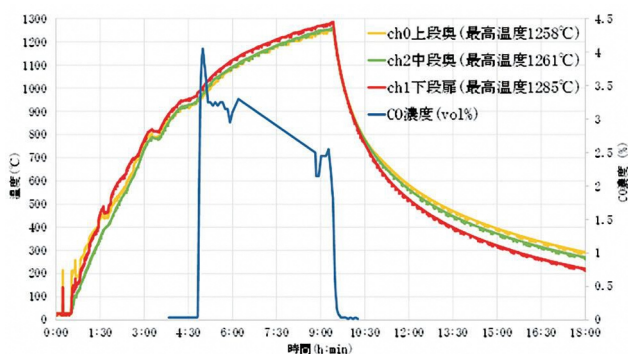


図6 0.1m³ガス焼成炉の温度計測試験結果 (SK9還元焼成)

度と比べて下段温度が高い値を示した。また、K型熱電対で取得した最高温度は上段が1258°C、中段が1261°C、下段が1285°Cを示し、リファサーモ指示温度と同様に上段温度、中段温度と比べて下段温度が高い値を示した。熱電対による温度計測試験結果を図6に示す。

熱電対では、最高温度のみならず、リファサーモでは観察することができない焼成温度の細かな時間変化を観察することができた。昇温開始～最高温度到達迄のヒートカーブに着目すると、上段、中段温度と比べて下段温度が高温側にシフトした。また、冷却時のヒートカーブに着目したところ、上段温度、中段温度と比べて下段温度の温度低下速度が速いことがわかった。

図7に0.1m³ガス焼成炉の内部構造模式図を示す。

昇温開始～最高温度到達迄のヒートカーブにおいて、下段温度が高温側にシフトしたのは、熱源(バーナー)に近い下段温度が先に上昇し、熱源から遠い中段、上段温度が遅れて上昇したためと推測される。本ガス焼成炉の場合、上段、中段温度と比べて、下段温度が約20°C高いことを考慮する必要がある。

また、冷却時のヒートカーブにおいて、下段温度の温度低下速度が速かったのは、熱が逃げやすい煙道に近い順に温度が低下したためと推測される。

図6に示すCO濃度(青線)に着目すると、CO濃度は、900°Cから1000°Cに入ったあたりから、4.05vol%まで上昇した。これは、ドラフトを950°Cから開けたことで、ドラフトから煙

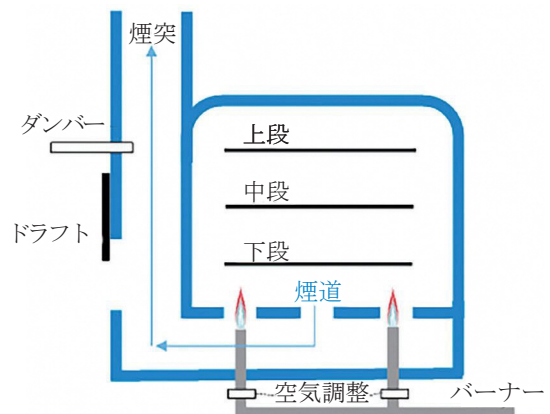


図7 0.1m³ガス焼成炉の内部構造模式図

道に侵入した外気が炉内から排出される空気の流れを抑える役目となり炉内への二次空気の流入が無くなり、不完全燃焼でCOが発生したためである。その後1280℃あたりで2.55vol%まで下降したことが確認できた。

以上のように、ウェブカメラをCO計に設置することによりリアルタイムでCO濃度を監視することができた。CO濃度の可視化は、還元状態を常に監視できるため、安定した還元状態に調整するのに効果的であると考えられる。

以上から窯の上段、中段、下段の3点の多点温度分布およびCO濃度のリアルタイム可視化システムが構築できた。

窯の多点温度分布データが収集できれば、製品の積み方の最適化や製品品質の安定化に役立つことが期待できる。

4. まとめ

本研究では、ガス焼成炉の炉内温度分布のリアルタイム可視化技術について以下の知見を得た。

- (1) 0.1m³ ガス焼成炉内の上段、中段、下段にK型熱電対を設置し、SK9還元焼成を行った結果、上段温度、中段温度と比べて下段温度が高い値を示すことが確認できた。
- (2) 0.1m³ ガス焼成炉のCOガス濃度の測定結果、CO濃度は900℃から1000℃に入ったあたりから、CO濃度が4.05vol% 迄上昇、その後1280℃あたりで2.55vol% 迄緩やかに下降したことが確認できた。
- (3) 0.1m³ ガス焼成炉内の上段温度、中段温度、下段温度の3点の多点温度分布およびCO濃度のリアルタイム可視化システムを構築できた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、IoT支援キットをご提供頂いた福岡県工業技術センター各位、IoT支援キットの操作方法及び温度センサー接続用の回路作成に御協力頂いた長崎県工業技術センター各位に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 経済産業省「工業統計表 品目別統計表データ」
<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/r02/kakuho/hinmoku/index.html>
- 2) 東日本電信電話、「未来につなぐ伝統とIoTの環、山梨から贈る陶芸仮想体験」
https://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20190219_01.html
- 3) 共通熱履歴センサー（リファサーモ）
<https://www.jfcc.or.jp/reference/thermo.html>