

— 経常研究 —

陶磁器分野における AI, IoT 活用技術の開発(その3)

陶磁器科 吉田 英樹、稲尾 恭敬、河野 将明、山口 英次

要 約

これまでに開発した IoT 機器を活用し、2室構造の登窯において温度測定を実施した。既設のR型熱電対2本による同時データ収集に加え、各室に配置したK型シーブ熱電対をラズベリーパイに接続し測定した結果、2～3℃の幅で細かく変動しながら温度が上昇する様子を捉えた。K型熱電対は耐熱金属製保護管により高感度な反応が可能だったためと考えられる。さらに赤外線サーモグラフィにより焼成物表面温度の直接測定に成功し、火止め直前の温度がR型熱電対の最高温度と一致することを確認した。加えて、シャトル窯の焼成データを用いたAI解析では、ニューラルネットワークコンソールによる回帰分析により、焼成歩留まりの予測可能性が示された。

キーワード：登窯、温度測定、熱電対、IoT 機器、AI 解析、ニューラルネットワークコンソール

1. はじめに

長崎県の代表的な伝統的工芸品である三川内焼は、約 400 年前に平戸藩主松浦鎮信(まつらしげのぶ)公が連れ帰った朝鮮陶工である巨関(こせき)らによって始められた。江戸時代に生み出された「唐子絵」、白磁に映える染付、および繊細優美な技法を駆使した「細工物」と呼ばれる「置き上げ」、「透かし彫り」、「卵殻手(らんかくで)」などの高度な技術は、現在に引き継がれている¹⁾。

今回測定を実施した登窯は、三川内焼窯元の有志により 1996 年に築炉されたもので、江戸時代に三川内地区で稼働していた登窯を継承した設計となっている²⁾。

図1に登窯の全景、図2に登窯本体の外観を示す。登窯は全長 5.3m、幅 2.5m で、胴木間(燃焼室)と2つの焼成室を有する連房式登窯である。胴木間には2箇所の薪投入口があり、下段の一の間焼成は胴木間への薪投入により行われる。上段の二の間は、一の間からの熱で予熱され、一の間焼成が終了したのち二の間側面にある焚口から薪を投入してさらに焼成を行う。

図3に登窯内部及び窯積みの様子を示す。高さは約 1m で、天井にはR型熱電対が設置されている。

本研究では、登窯の焼成挙動をより精密に把握することを目的に、これまで培ったIoT温度測定技術を活用した温度測定を実施した。

さらに、AIを活用した焼成プロセスの解析技術



図 1 登窯の全景



図 2 窯本体の外観 左:正面 右:上面

を検討する一環として、焼成温度と歩留まりの相関関係に着目し、ディープラーニングを用いて歩留まりを予測する手法について検討を行った。

2. 研究内容

2.1 IoT温度測定技術による登窯の焼成挙動解析

2.1.1 熱電対を用いた温度測定

図4に窯本体の図面及び測定機器の配置を示す。登窯の各部屋の天井にはセラミックス保護管

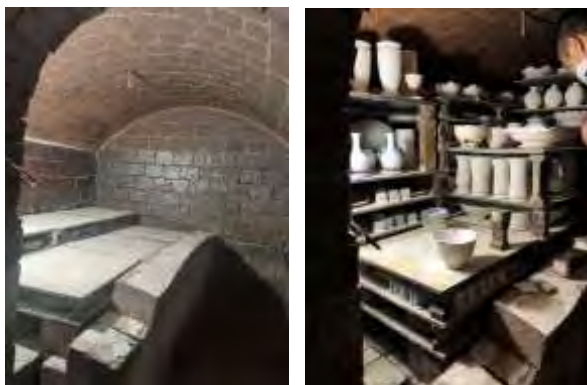


図3 窯内部及び窯積みの様子

に封入された密閉端子型のR型熱電対が1本ずつ既設されている。これらの熱電対をデータロガー(グラフテック製GL200A)に接続し、5秒間隔で焼成温度を記録した。一方、一の間及び二の間の天井からはK型シーす熱電対を1本ずつ挿入し、各部屋の中央前方寄りの焼成温度を測定できるように設置した。これらの熱電対をラズベリーパイに接続し、1秒間隔で焼成温度を記録した。さらに、モバイルルーターを使用することによりラズベリーパイで取得した温度データがPCやスマートフォン、タブレットでリアルタイム閲覧可能か確認した。

2.1.2 赤外線サーモグラフィーを用いた温度測定

開口部になっている二の間の焚口から、赤外線サーモグラフィー(チノー製CPA-8200)を用いて窯内部の焼成物表面温度の直接測定を試みた。

2.2 AI解析による焼成歩留まり予測

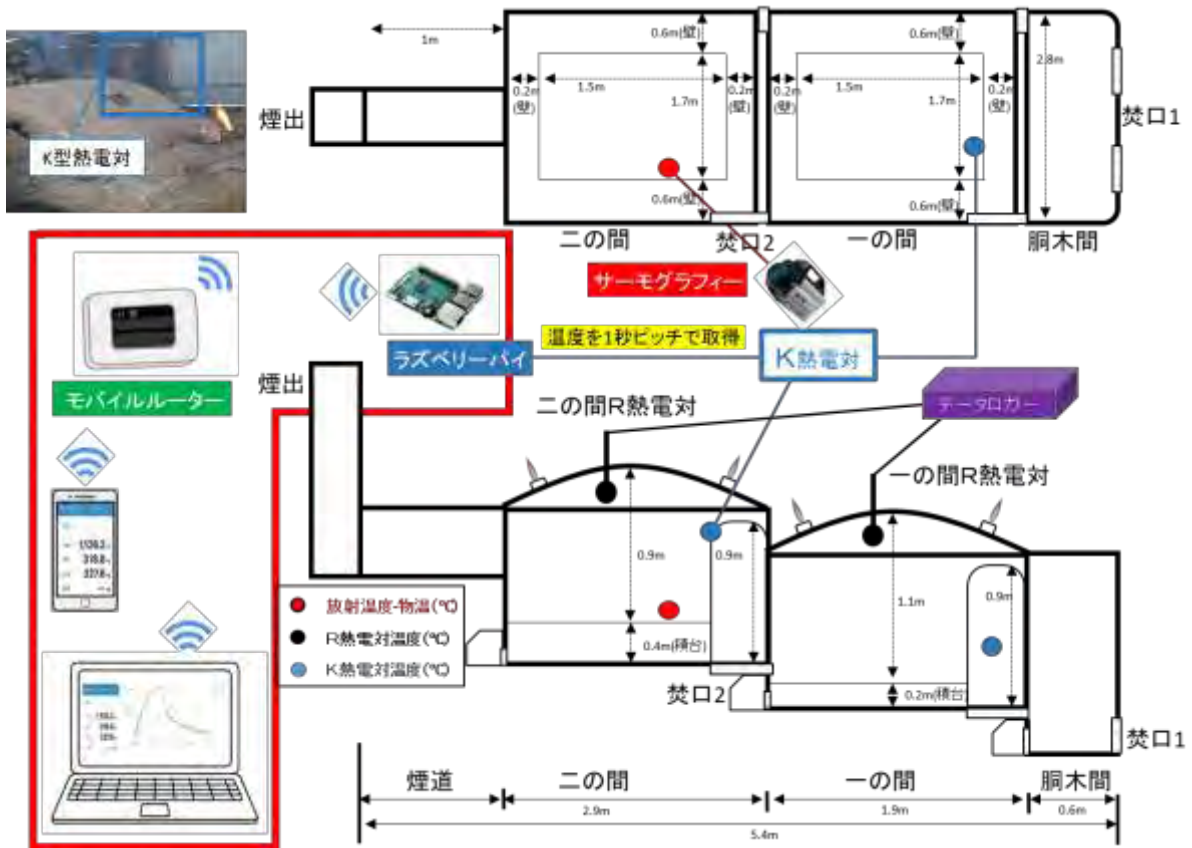


図4 窯本体の図面及び測定機器の配置

2.2.1 解析用データの取得

AI解析は、一般的な量産焼成炉であるシャトル窯の焼成データを用いた。今回取得した焼成温度データに加えて、焼成特性に影響を及ぼすことが経験的に知られている外気温及び気圧を入力データとして用い、焼成歩留まりデータを出力データとすることで焼成歩留まりを予測する構造化データの回帰分析を行った。解析ソフトウェアにはソニーコミュニケーションズ製のニューラルネットワークコンソールを用いた。本ソフトウェアは、プログラミングの知識がなくても多様なディープラーニング解析を行うことができ、無償で利用可能である。

今回解析に用いた焼成温度データは、1回の焼成を秒間隔で取得したためデータ量が膨大となり、すべてのデータを使用すると解析に多大な時間を要することになる。そこで、本研究では焼成プロセスにおいて重要なポイントである、陶土中の有機物の燃焼が終了する 500℃付近、還元雰囲気に切り替わる 950℃付近、及び最高温度に着目し、最高温度到達の5時間前を還元雰囲気開始温度、8時間前を有機物燃焼温度と定義して解析に用いた。また、焼成時の外気温及び気圧は気象庁サイトから取得した。なお、今回の解析には、学習用データ 64 組、評価用データ 18 組を用いた。

2.2.2 解析用データの整形と加工

AI解析においては、収集したデータを解析ソフトで読み込める形に整形、加工する前処理を行わなければならない。本研究では、各データ列の平均値を0、分散を1となるようにスケーリングする「Zスコアスケーリング」という前処理手法を用いた。この前処理は、ニューラルネットワークコンソールに備わっている変換機能を用いて行った。

2.2.3 ディープラーニング解析

ニューラルネットワークコンソールには、様々な解析手法がテンプレートとして備わっており、今回解析に用いた構造化データの回帰分析手法もテンプレートから選択するだけで計算が可能となる。

3. 結果と考察

3.1 IoT 温度測定技術による登窯の焼成挙動解析

3.1.1 熱電対を用いた温度測定

図5に既設のR型熱電対で得られた焼成温度の時間変化グラフを示す。登窯は1日目の午前8時に焚き始め、2日目の午後6時30分に薪投入を終了した。燃焼室である胴木間に薪を投入することで一の間温度が上昇し始め、約11時間後に950℃に到達した。950℃からは還元雰囲気となり、その後さらに薪を投入することで最高温度1223℃まで上昇した。一の間焼成が終わると胴木間の焚口2箇所をレンガで塞いで空気の流入を遮断した。

一方、二の間は、一の間焼成中の熱が伝わることにより温度上昇し、一の間が最高温度に到達した段階では950℃まで上昇した。一の間焼成が終了した後は、二の間側面の焚口から薪の投入を開始した。薪投入開始後、二の間の焼成温度は2時間で1200℃まで一気に上昇し、その後薪の投入を続けることで最高温度1288℃に到達した。最終的にはゼーゲルコーンの倒れ具合やあげてみの色味を確認し、二の間の焼成を終了した。

図6にK型シース熱電対で得られた焼成温度の時間変化グラフを示す。前半の7時間までは、ラズベリーパイのセッティングがうまくいっておらず、温度データが正常に取得できていない。K型シース熱電対で取得したデータは、R型熱電対で取得したデータに比べ、細かに上下動していることがわ

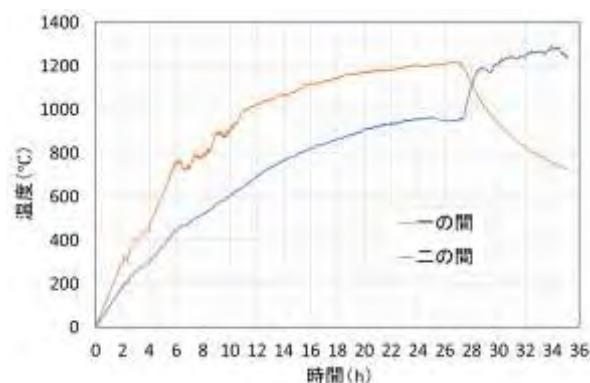


図5 既設のR型熱電対で得られた焼成温度の時間変化

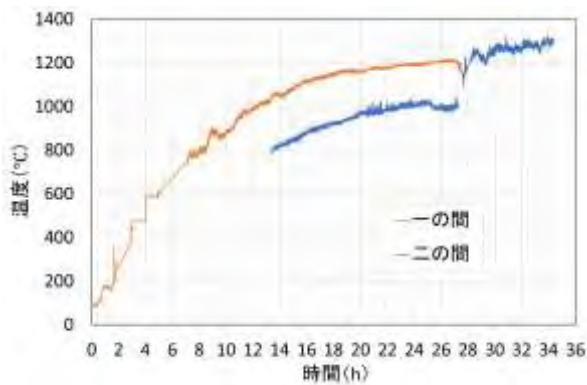


図6 K型シーす熱電対で得られた焼成温度の時間変化

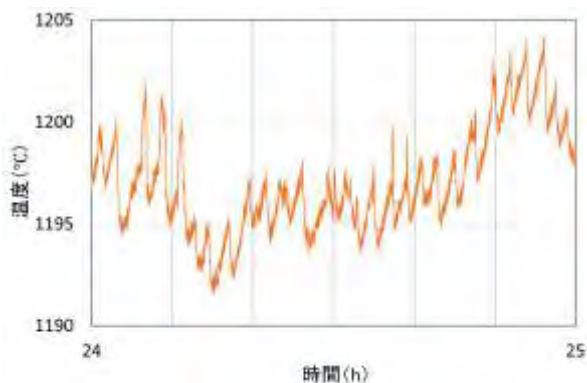


図7 一の間の24時間後から1時間分のデータを拡大したグラフ

かる。

図7に一の間の24時間後から1時間分のデータを拡大したグラフを示す。拡大すると2~5°Cの幅で細かく上下動しながら徐々に温度上昇していることがわかる。この上下動は、投入した薪の燃焼により温度上昇し、燃焼し終わると温度が下降し始め、温度下降が始まったら次の薪を投入する、という作業を繰り返すことで形成されている。すなわち、上下動のピークの数から薪の投入回数を推測することができる。R型熱電対ではこのような細かな上下動は観測されておらず、K型シーす熱電対に特有のデータ構造である。これは、R型熱電対が熱伝導率の低いセラミックス保護管に封入されているのに対し、K型シーす熱電対は耐熱金属製の保護管に封入されているため、温度に鋭敏に反応できたと考えられる。

陶磁器やセラミックスの焼成に使用されるガス窯や電気炉は、安定した温度制御が可能であり、温度測定には耐久性などを踏まえてセラミックス保護管封入型のR型熱電対を使用するのが一般

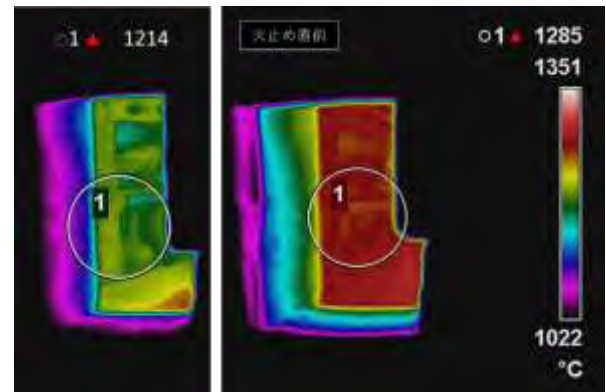


図8 焼成途中及び火止め直前の測定結果
(左)焼成途中 (右)火止め直前

的である。そのような背景から、全国あるいは世界的に見ても稼働中の登窯ではR型熱電対が使用されていると思われる。今回、図らずも耐熱金属製保護管に封入したK型熱電対を使用したことで、ガス窯や電気炉にはない登窯特有の細かな温度変化を高精度に測定することに成功した。

また、モバイルルーターを介して、ラズベリーパイの温度データ配信画面をスマートフォンやタブレットでリアルタイム閲覧できることを確認できた。

3.1.2 赤外線サーモグラフィーを用いた温度測定

赤外線サーモグラフィーを用いた試験では、二の間側面の開口部である焚口から、薪投入の合間を縫って窯内部の直接温度測定を行った。図8に焼成途中及び火止め直前の測定結果を示す。図中の表示温度は、円で囲った範囲での最高温度を示している。図の左に示す焼成途中の結果では円内での最高温度が1214°Cであったが、図の右に示す火止め直前の結果では、焼成物の表面温度が1285°Cを示しており、R型熱電対で測定した火止め直前の最高温度1288°Cにほぼ等しい温度に到達していることが確認できた。この結果



図9 窯出した製品

	A	B	C	D	E	F
1	Temp	Pressure	F_Temp1	F_Temp2	F_Temp3	yield
2	27.2	1008.7	551.5	954.7	1293.9	0.927
3	28.1	1009.3	585.4	983.9	1299.6	0.821
4	28.3	1007.8	549.7	995.4	1304.7	0.806

図 10 収集データ(一部抜粋)

	A	B	C	D	E	F
1	x_0Temp	x_1Pressure	x_2F_Temp1	x_3F_Temp2	x_4F_Temp3	y_yield
2	0.029452665	-1.370742993	0.130891231	-1.806807420	-0.101085292	0.583480134
3	0.040514471	-1.296527445	1.363178562	0.082788828	0.596907815	0.816524949
4	0.087339296	-1.579851374	0.122314031	-1.589895451	1.219723612	-1.089407743

図 11 前処理後のデータ(一部抜粋)

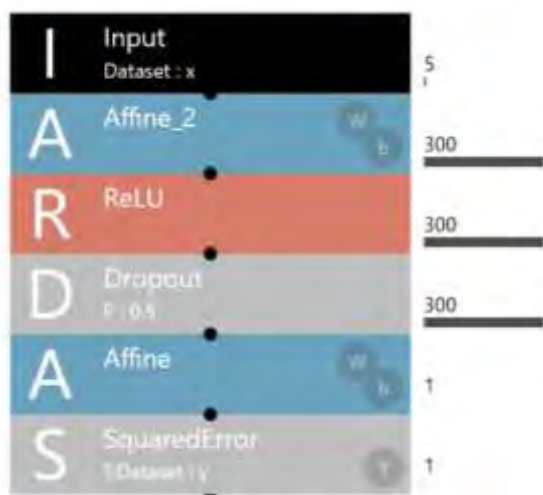


図 12 ニューラルネットワーク構造

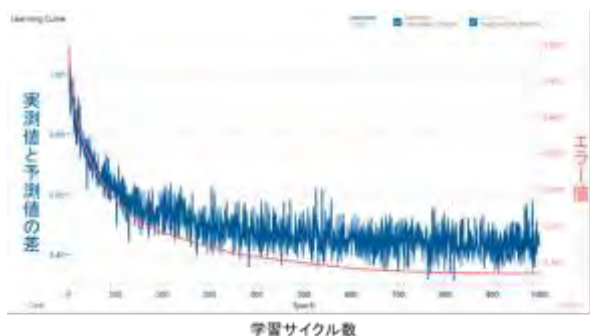


図 13 学習結果

も、登窯に特有の薪投入用の開口部があることで初めて測定に成功したものである。

図 9 に窯出した製品の写真を示す。磁器が非常に白く焼き上がっており、しっかりと還元がかかっていたことがわかる。製品を積み場所によっては灰が表面にかかり、特有の色合いや風合いが出ているものもあった。

3.2 AI解析による焼成歩留まり予測

3.2.1 解析用データ

図10に収集したデータの一部を示す。A列から外気温、気圧、焼成温度 1(最高温度到達8時間前の焼成温度)、焼成温度 2(最高温度到達5時間前の焼成温度)、焼成温度 3(最高温度)が格納され、最後の列には焼成歩留まり値が格納されている。本解析では、外気温から焼成温度3までのデータを入力として、最後の列に示す焼成歩留まり値を予測として出力するニューラルネットワークを学習した。

3.2.2 データの前処理結果

図11にニューラルネットワークコンソールの前処理機能によりZスコアスケールで正規化したデータの一部を示す。いずれも、平均が 0 で分散 1 に正規化されている。

3.2.3 ディープラーニング解析結果

図12に構造化データの回帰分析を行うニューラルネットワーク構造を示す。「Input」は入力層を示し、今回用いた図11に示すxにあたる入力数5を設定した。そのあとのネットワークは回帰分析のためのシンプルな全結合ネットワークを示している。

このネットワークを基に 1000 回繰り返し学習を実行した結果を図13に示す。繰り返し学習を行うことで前半は実測値と予測値の差が縮まるものの、800 回を超えたところから下がらなくなり、エラー値も 0.37 あたりで変化がほぼなくなった。すなわち、今回の回帰分析の精度は約 60% であり、まだ十分な精度とは言えない。今後の精度向上のためには、学習データ数の増加や解析条件の最適化などが必要である。

4. まとめ

これまで開発してきたIoT機器を活用し、2室を有する登窯の温度測定を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 熱電対を用いた温度測定においては、既設の2本のR型熱電対の温度データをデータロガーにより細かく収集することができた。
- 2) R型熱電対とは別に各室に1本ずつ配置したK型シース熱電対をラズベリーパイに接続し、焼成温度を収集した結果、2～3℃の幅で細かく上下動しながら徐々に温度上昇していく様子が確認できた。K型シース熱電対が耐熱金属製の保護管に封入されているため、温度に鋭敏に反応できたと考えられる。
- 3) 赤外線サーモグラフィーによる窯内部の直接温度測定の結果、焼成物の表面温度を直接測定することに成功し、火止め直前の結果では、焼成物の表面温度が、R型熱電対で測定した火止め直前の最高温度にほぼ等しいことが確認できた。
- 4) 一般的な量産焼成炉であるシャトル窯の焼成データを用いてAI解析を試みた結果、収集したデータを、ニューラルネットワークコンソールを用いて構造化データの回帰分析を行うことで、焼成歩留まりの予測可能性を確認できた。

文 献

- 1) 三川内陶磁器工業協同組合ホームページ、「みかわち焼の代表技法」、
<https://www.mikawacheware.or.jp/learn/technique/>
- 2) 三川内陶磁器工業協同組合ホームページ、「登り窯」、
<https://www.mikawacheware.or.jp/learn/climbingkiln/>

謝 辞

本研究を実施するにあたり、IoT支援キットを提供いただ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製にご協力いただいた長崎県工業技術センター各位、還元焼成統合管理システムの開発及び商品化にご尽力いただいた東京芸術大学及び(株)アイエスエイ各位、量産窯での温度測定試験

にご協力いただいた波佐見陶磁器工業協同組合各位、登窯での温度測定試験の場をご提供いただいた三川内陶磁器工業協同組合各位に深く感謝いたします。