

資 料

熱流体シミュレーションを活用した瓦乾燥炉の改善事例

小松原 聡*・福田 健一*・江木 俊雄**・原田 達也***

1. 目 的

島根県西部地域は、石州瓦の名称で知られる粘土瓦の生産地であるが、全国的にも粘土瓦の出荷推移は減少傾向にある¹⁾。そこで、島根県産業技術センターでは、石州瓦の耐凍害性と耐塩害性の評価²⁾や、乾燥時における変形挙動の研究³⁾により、石州瓦の高付加価値化、生産性の向上を支援している。

乾燥時の反り等の「変形」に関しては、一定値を超えると製品にできないため、一度に大量の粘土瓦を乾燥させる製造工程において、乾燥斑をより少なくし不良品を減らすことが、コスト低減、廃棄物削減、省エネ等のためにも急務である。乾燥炉の装置メーカーにより、乾燥炉内の瓦素地の載置方法を工夫して変形対策する報告⁴⁾がなされているが、乾燥風の流速が均一でないことに起因して、瓦素地に乾燥斑が生じる可能性がある。本報告では、乾燥時の「変形」の一因である乾燥斑は乾燥炉内の気流に原因があると仮定し、その対策に、熱流体解析技術（CFD：Computational Fluid Dynamics）を用いて、整流板により乾燥炉内の気体の流れを変えることにより、乾燥斑が小さくなることを予測した。このシミュレーション結果を基にして、瓦会社の乾燥炉を使用して、整流板による気体の流れの変化、「変形」、歩留まりについて検証した。これらの結果について報告する。

2. 方 法

2.1 ソフトウェア

今回解析を行うためのソフトウェアは電子機器熱流体解析ツールANSYS Icepak4.4.8（公益財団法人JKA平成18年度補助物件）を用いた。Icepakは電子機器の解析向けに有効な様々な機能を有しており、ソルバーにはCFDソフトウェアのANSYS Fluentが搭載されている。

2.2 モデル形状

図1は今回検討した乾燥炉の概念図である。トンネル式乾燥炉の中央に瓦素地を載置して保持する水平状の載置棚を十数段設けた搬送ラックが進行する。その左右両側から

*熱制御システム開発プロジェクトチーム（現：熱・シミュレーション応用技術開発プロジェクトチーム）、**無機材料・資源科、***無機材料・資源科（現：材料技術科）

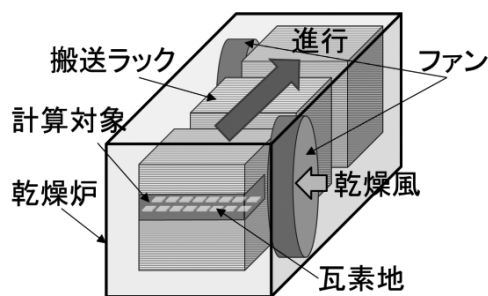


図1 乾燥炉概念図

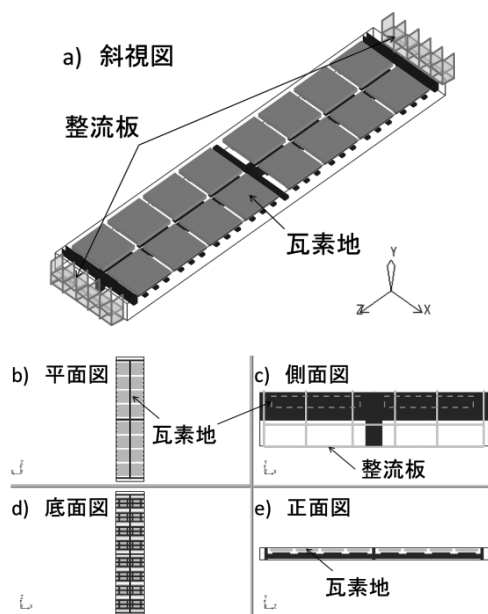


図2 計算対象モデル

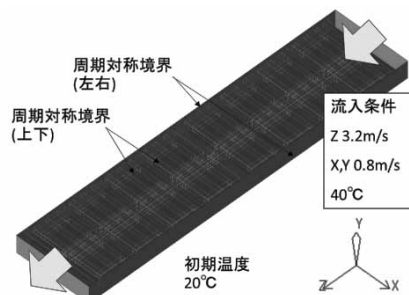


図3 境界条件

可動式ファンにより温度及び湿度を制御した乾燥風を送風している。今回の計算対象として、搬送ラックの載置棚1段分の構造について、搬送ラックの進行方向に2列かつ乾燥風の流れ方向8枚の瓦載置をモデル化した。図2に計算対象モデルを示す。灰色の直方体が瓦素地、黒色が載置棚のフレームである。図はそれぞれ、a) 斜視図、b) 平面図、c) 側面図、d) 底面図、e) 正面図である。可動ファンは、図1に示すように進行方向の左右に互い違いに設けられており、斜視図a)の紙面左上方向に搬送ラックが進行するのに伴い、紙面の右上方向と左下方向から交互に乾燥風が流入することとなる。なお、図の縮尺はb)、d)のみが同一で、他は全て異なる尺度で示してある。また、a)斜視図、c)側面図に後述する格子状の整流板を模式的に示した。

2.3 解析条件

図3に解析モデルの境界条件を示す。解析範囲は紙面上側に乾燥風の流入口(幅0.82m×高0.192m)を設け、流入口から流出口までの長さは3.62mとした。流入条件は、事前に行った乾燥風の風速実測結果を基に、左下(Z)方向に3.2m/s、ラック垂直上(Y)方向および乾燥風流れの水平左(X)方向(搬送ラック進行方向と逆方向)に0.8m/sとし、流入口に対して斜め方向に流入する流れを代表的に設定した。上下左右方向の流れが生じるのはラック近傍で大型のファンを回転させて送風している影響と考えられる。また、ラック垂直上下、流れに対して水平左右方向の境界は周期対称境界とした。

瓦の乾燥現象を厳密に解析するのは難易度が高く、計算コストもかかると判断し、温風による瓦温度上昇の分布を解析することで、乾燥斑を評価することを試みた。計算は瓦素地の初期温度を20℃、乾燥風の流入温度を40℃とした非定常解析を実施し、600秒後の瓦表面の温度分布により乾燥斑を評価することとした。なお、乾燥風は搬送ラック

表1 各材料物性値

物性値名	単位	空気	鋼材	粘土
密度	kg/m ³	1.1614	7800	1700
熱伝導率	W/m/K	0.0261	36	1.2
比熱	J/kg/K	1005	486	1800
粘性係数	kg/m/s	1.84e-5	—	—

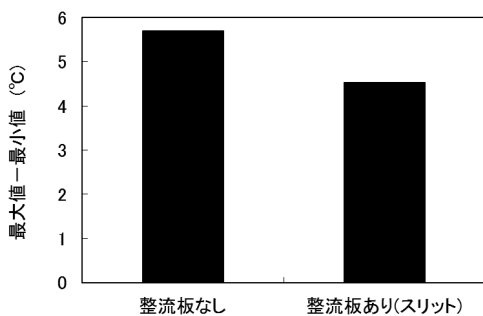


図8 瓦A表面温度の最大値と最小値の差

側面の大型ファンの回転により発生させているため、乾燥風速度ベクトルのZ成分の向きは一定であるが、X成分とY成分の向きは、ラック下半部と上半部で逆転する。しかし、垂直上下方向、水平左右方向ともに周期対称境界

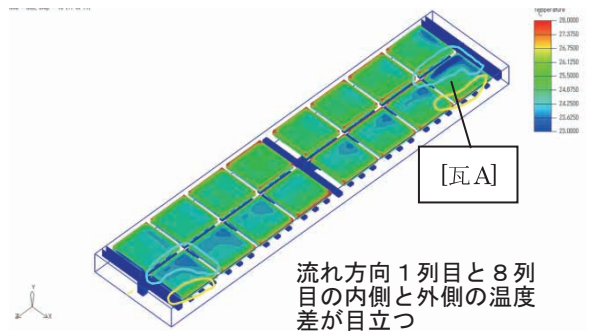


図4 600秒後の瓦表面温度分布(対策前)

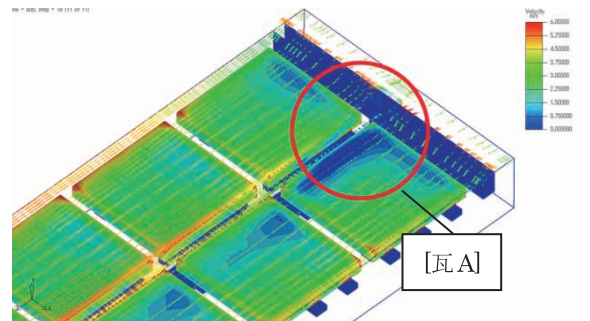


図5 流入口近傍の瓦表面温度分布と速度ベクトル(対策前)

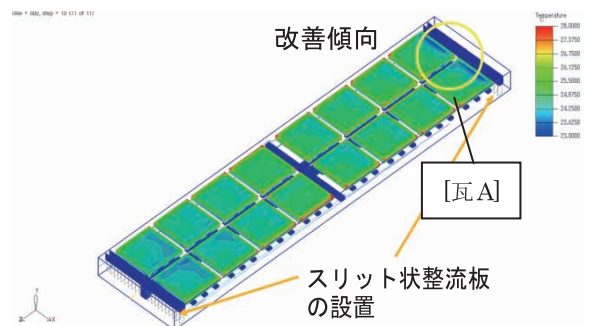


図6 600秒後の瓦表面温度分布(スリット状整流板あり)

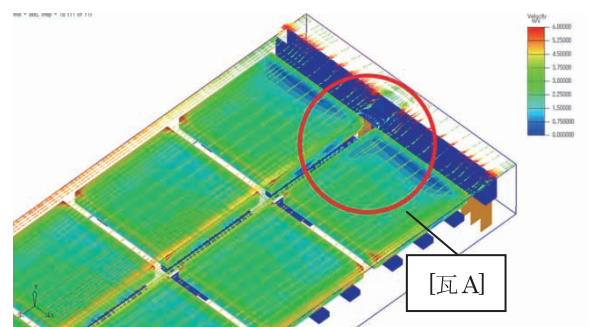


図7 流入口近傍の瓦表面温度分布と速度ベクトル(スリット状整流板あり)

を仮定しており、瓦表面の温度分布は位置関係が変化するので、乾燥斑については本質的に同一と考えられるので、流入する乾燥風速度ベクトルは前述した代表的な1条件のみでシミュレーションを行った。

2.4 材料物性値

使用した物性値として、流体には空気、ラックは鋼材、瓦は粘土を設定した。表1にシミュレーションに用いた各材料物性値を示す。

2.5 実証実験

2.3項のシミュレーションによる解析において整流板を設けることが、乾燥過程での温風による瓦温度上昇の均一化に効果が認められたことから、瓦工場の製造現場において、シミュレーションでの検討結果を基に、実際に整流板有無にて実証実験を行った⁵⁾。搬送ラックは15段の載置棚を有しており、整流板は予備実験で特に反り量の大きかったラック下側半部に設置した。実証実験では効果の確認のため、スリット状整流板および格子状整流板のそれぞれについて、搬送ラック1台分、計720枚の瓦素地を対象として行った。なお、整流板の間隔は、設置位置および重量の制約により、シミュレーションで使用した寸法とは異なっている。

3. 結 果

3.1 シミュレーション

図4に対策前の600秒後の瓦表面温度分布を示す。暖色ほど温度が上昇しており、寒色ほど温度上昇していない状況を示している。温度が上昇しているとは乾燥が早い、温度が上昇していないとは乾燥が遅いと推察され、その差により乾燥斑を評価した。前記した通り斜めに流入する温風と瓦列間のフレームの支柱等による影響で、特に流入直後と流出直前の瓦に温度不均一が顕著に見られる。黄枠で示した領域は温度が高く、青枠で示した領域は温度が低い。図5に流入直近傍の瓦表面温度分布と速度ベクトルを示す。フレームの影響で瓦近傍の流れに強弱が生じており、流れの弱い辺りの瓦温度が上昇していないことがわかる。

これを改善する手段として、流入口及び流出口側のラック端部に整流板を設置する案について検討した。整流板の構造はA)スリット状とB)格子状である。この形状は、スリット状整流板については、X方向(搬送ラックの進行方向)の乾燥風流速差の解消を意図したものであり、格子状整流板については、それに加えてY方向(載置棚の上下方向)の均一化も意図したものである。なお、流出側にも設置する理由は、図1に示した概念図のとおり、ラックの両側に位置をずらしてファンが設置されており、ラックの進行に従い、流入・流出が入れ替わるためである。

図6、7にA)スリット状整流板を設置したときの解析結果を示す。スリット状整流板の構造は、スリット間隔38mm(中央部98mm)、スリット高さ117mm、スリット奥

行45mm、スリット板厚は無視し、断熱薄板とした。図6は図4と同様に600秒後の温度分布である。図4に比べて、温度分布が均一化され改善傾向であることがわかる。特に黄丸で示した辺りの流入直近傍の瓦温度分布が改善されている。図7は図5と同様に流入直近傍の瓦表面温度分布と速度ベクトルを示す。やはり、赤丸で示した辺りの流入口

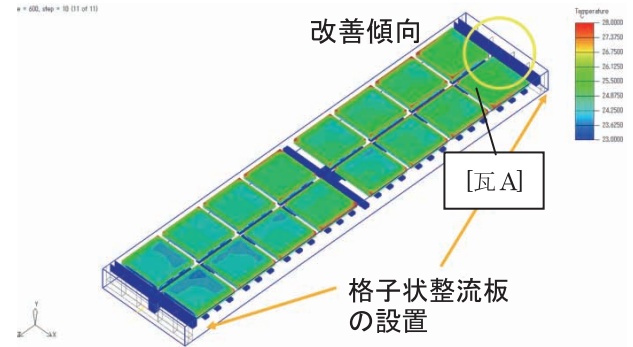


図9 600秒後の瓦表面温度分布(格子状整流板あり)

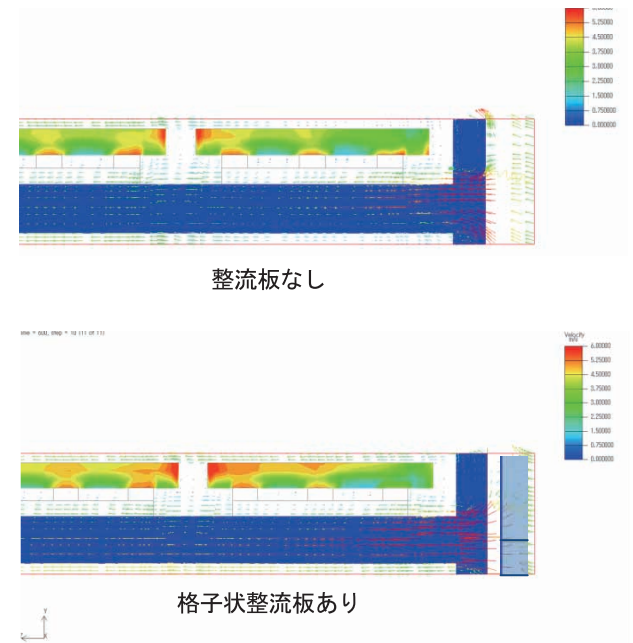


図10 流入直近傍正面図における瓦表面温度分布と速度ベクトル

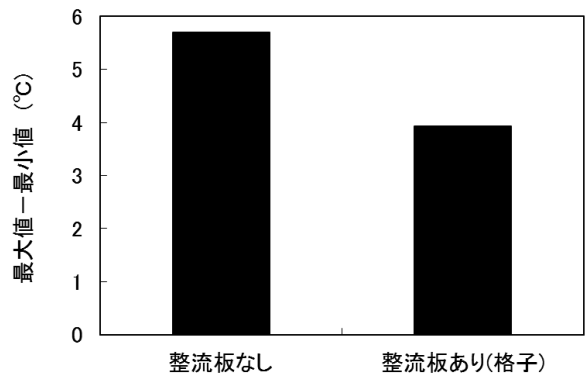


図11 瓦A表面温度の最大値と最小値の差

近傍の流れが整流化され、瓦温度分布が改善されている。図8に流入口直後の流れ方向に向かって左側の[瓦A]上表面温度の最大値と最小値の差を比較した図を示す。整流板なしに比べて、A) スリット状整流板を設けることにより、温度差を約20%低減できており、乾燥斑の抑制につながると考えられる。これにより、スリット状の整流板の有効性が示唆された。

次に、図9にB) 格子状整流板を設置したときの解析結果を示す。格子状整流板の構造は、水平板を追加するため、格子開口部水平方向約151mm(中央部211mm)とし、スリット状の整流板に比べ、枚数を減らして軽量化を図った。また、開口部高さ方向132.5mmと57.5mmの繰り返し構造、奥行40mm、格子板厚1mmとした。図9は図4と同様に600秒後の温度分布である。A) スリット状整流板を設置したときと同様、図4に比べて、温度分布が均一化され改善傾向であることがわかる。図10に整流板なしの場合とB) 格子状整流板を設置した場合の流入口近傍正面図における速度ベクトルを示す。整流板なしでは瓦上面への流れが弱く、流入口側から1枚目の瓦表面の温度差が大きいのに対し、格子整流板では、垂直方向の流れが制御され、1枚目の瓦上面へも流れが生じていることがわかる。図11に図8と同様の比較を整流板なしとB) 格子状整流板にて示す。整流板なしに比べて、B) 格子状整流板を設けることにより、温度差を約30%低減できており、乾燥斑の抑制につながると考えられる。これにより、格子状の整流板の有効性が示唆された。また、シミュレーション結果からは、格子状整流板の方がスリット状整流板より、効果が大きいものと考えられた。

3.2 実証実験

図12は実際の瓦製造現場において行った、スリット状整流板(スリット間隔39mm, スリット高さ315mm)を用いた場合と、用いない場合とを比較した乾燥後の瓦素地反り量標準偏差の比較である。この図に示すように、8段目から15段目の載置棚の品質のばらつきを示す標準偏差(反り量のばらつき)は整流板を設置していない1段目から7段目に比べて低減しており、乾燥における瓦素地の品質のばらつきは、整流板の設置によって飛躍的に改善されている。これにより、乾燥後の歩留まりも整流板を設けることで、8.7%改善された。

次に、図13に基づき、格子状整流板(格子開口部水平182mm, 高さ190mm)の効果を説明する。図13(A)は、整流板を設けない場合、図13(B)は格子状整流板を設けた場合における乾燥風の垂直成分の風速を示すものであり、図の上段は上から2段目の載置棚、中段は上から9段目、下段は上から15段目における各部垂直成分の風速を示している。図中の横軸、奥行軸は載置棚におけるポイントを示している。

もともと反り量の大きくなかったラック上部にあたる上

から2段目の載置棚上の垂直成分の風速は整流板の有無にかかわらず低い。しかし、反り量が大きかったラック下側半部にあたる上から9段目及び上から15段目の載置棚では、整流板を設けない場合には、各部における垂直成分の風速にばらつきがあるが、整流板を設けた場合には、各部における垂直成分の風速のばらつきが抑制され、その大きさも全体的に低減されており、良好な結果が得られた。ちなみに、これらの図示に示す例では、紙面における左側から右側に向かって乾燥風が流動している。

また、これとほぼ同一の格子状整流板を設けた条件で、瓦の製造を所定枚数行った。その結果、焼成後の完成品において、整流板のない場合の反り等の変形による不良品の割合から、整流板のある場合の反り等の変形による不良品の割合を引いた値は+3.7%になり、大きな改善が見られるとともに、整流板のない場合の亀裂による不良品の割合から、整流板のある場合の亀裂による不良品の割合を引い

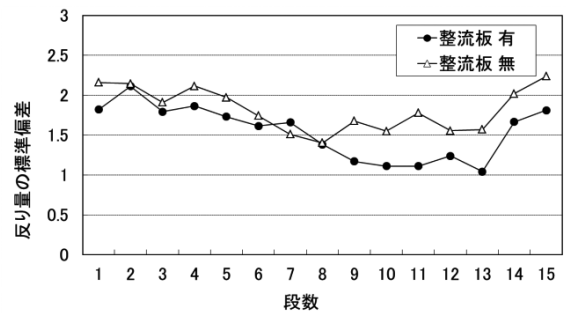
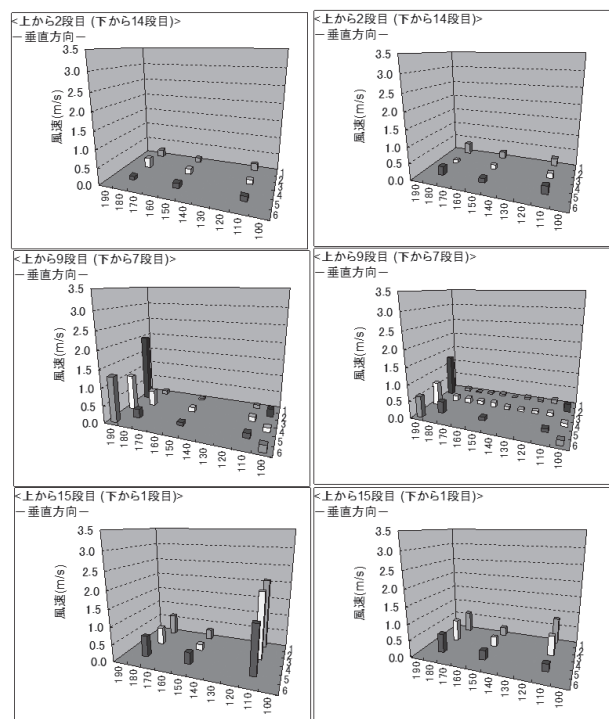


図12 実証実験における乾燥後の瓦素地反り量の標準偏差



(A)整流板なし (B)格子状整流板あり

図13 乾燥風の垂直成分の風速

た値は、+4.2%になり、これも大きな改善が見られた。

さらに、格子状整流板を用いた場合と用いない場合で、瓦素地を乾燥させた後の歩留まりを調査した結果、整流板を用いた場合の方が、用いない場合よりも、11.7%も歩留まりが向上した。この改善率は、スリット状整流板の場合の8.7%より大きかった。

以上、瓦の乾燥状態を厳密に解析しなくとも、熱流体シミュレーションを活用して、温風による瓦温度上昇の分布を解析することで、乾燥斑を評価するという簡便な手法を確立した。これにより、瓦素地を安定的に乾燥可能としたことは、コスト低減、廃棄物削減、省エネ等に貢献し、石州瓦の生産性向上につながるものである。

謝 辞

本研究を遂行するにあたりご協力いただきました株式会社石州川上窯業 川上兼之氏、高浜工業株式会社 川島季之氏をはじめ関係各位に深甚なる謝意を表します。本報告は

平成20年度しまねものづくり高度化支援事業による研究成果の一部である。

文 献

- 1) 全国陶器瓦工業組合連合会, 粘土瓦の出荷推移と新築住宅着工戸数. http://www.zentouren.or.jp/content05/statistical_chart-ble2011.pdf.
- 2) 中島剛, 前原清霞, 高橋青磁, 原田達也, 江木俊雄. 石州瓦と比較した外国産瓦の耐凍害性と耐塩害性. 島根県産業技術センター研究報告. 2013, no. 49, p. 13-19.
- 3) 原田達也, 江木俊雄. 風化花崗岩配合粘土の乾燥時における変形挙動. 島根県産業技術センター研究報告. 2012, no. 48, p. 43-46.
- 4) 高砂工業株式会社. 瓦素地乾燥方法. 特許第3708158号. 1996-09-10.
- 5) 島根県, 高浜工業株式会社, 株式会社石州川上窯業. 瓦又は陶磁器製造用の乾燥装置. 特開2012-214312. 2012-11-08.