

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：50104  
研究種目：若手研究  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21K14061  
研究課題名（和文）低次元セルオートマトン法による製造バラツキを反映した焼入れシミュレーション

研究課題名（英文）Quenching simulation including manufacturing variations by the low-dimensional cellular automaton method

研究代表者  
杉本 剛（Sugimoto, Tsuyoshi）  
旭川工業高等専門学校・機械システム工学科・准教授

研究者番号：30878161  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：量産で用いられる集団焼入れを低負荷のシミュレーション上で再現する為、低次元セルオートマトン法とそのCFDとの組み合わせを実装し、低次元セルオートマトン法の集団荷姿への適用可能性を確認検証した。実際の集団荷姿での熱処理変形や蒸気膜崩落状態分布の確認を行った。CFDと低次元セルオートマトンを組み合わせた計算により、直径180mmのリング形状部品において熱処理変形分布を再現する事が出来た。以上の事により、量産熱処理工程に於いて行われる集団荷姿での焼入れで起こる熱処理変形バラツキやその繰り返し変動をシミュレーションにて再現する事に成功した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

熱処理は鉄鋼高強度部品を作るには必要不可欠な処理であるが、その過程で起こる熱処理変形は繰り返し不安定性やマルコフ性を持ち、従来の決定論的なシミュレーションでは予測困難であった。CASE等の超高精度形状を有する部品の製造が必要になっている昨今、熱処理変形を高精度の予測する需要は大いに高まっているが、従来手法ではその実現は困難であった。本研究により安価かつ特別な技術を要せず熱処理変形を予測できる手法が考案できたため、実際の現象を明確に理解している熱処理工程の生産技術エンジニアが、高度なシミュレーション技術を用いる事なく本来業務と並行して実際の品質を予測する事が出来、高い要求に答える事が出来る。

研究成果の概要（英文）：In order to reproduce groupe process of quenching used in mass production on a low-load simulation, we implemented a low-dimensional cellular automaton method and its combination with CFD, and verified the applicability of the low-dimensional cellular automaton method to collective simulation method. We confirmed the heat treatment deformation and vapor film collapse state distribution in actual process. By calculation using a combination of CFD and low-dimensional cellular automaton, we were able to reproduce the heat treatment deformation distribution in a ring-shaped part with a diameter of 180 mm. As a result of the above, we succeeded in reproducing, through simulation, the variation in heat treatment deformation and its repeated fluctuations that occur during quenching in the mass-packed form during the mass production heat treatment process.

研究分野：生産分野

キーワード：熱処理変形 セルオートマトン 焼入れ バラツキ 量産荷姿

## 1. 研究開始当初の背景

金属部品を油焼入れする際には図 1 に示すように油の沸騰による蒸気膜段階・沸騰段階・対流段階が発生する。この状態遷移を定量化することは熱処理品質・熱処理ひずみの形成要因解明につながる。一方で実際の熱処理部品の焼入時における蒸気膜崩落を観察すると、図 2 に示すように一点から蒸気膜崩落が始まり崩落が周方向に広がるような挙動を示す事があり、これは軸の曲がりやリング部品等の不均一な周方向の変形につながる事が報告されている。

本研究では低次元セルオートマトン法による蒸気膜崩落の形態の計算に蒸気膜振動の影響を加味し、複数回の冷却解析を行う事で軸対象部品に起こる熱処理変形バラツキの予測を試みた。また、CFD と組み合わせる事で集団荷姿での熱処理ひずみの予測手法の構築も行った。



図 1. 円筒における蒸気膜崩落の様子 図 2. 円環歯車における蒸気膜崩落の進展

## 2. 研究の目的

本研究の目的は従来高規模に集積された計算機でしかシミュレーションができなかった非常サブクール沸騰におけるの熱伝達の様子を、「低次元セルオートマトン法」により超低負荷で計算する手法を開発することである。低負荷の計算によりサブクール沸騰が内包する「複雑性」(~繰り返し不安定性)を繰り返し計算にて解けるようになる。これを産業的に活用すると、熱処理工程で問題になる繰り返し品質ばらつきや、種々冷却・熱輸送装置の不安定性等が MBD(モデルベース開発)上で取り扱えるようになる。

## 3. 研究の方法

まず、焼入れの内、蒸気膜崩壊の重要性確認を行った。次に観察より確認できた、蒸気膜崩壊様式に対応して熱処理変形が生じている事実より、蒸気膜崩落を再現する為のセルオートマトンを作成した。作成したセルオートマトンを用い、単純形状で種々の油の焼入れでの冷却曲線を再現できるか、複雑形状での焼入れ変形を再現できるか、集団荷姿での焼入れ変形を再現できるか検証した。

## 4. 研究成果

蒸気膜崩壊の観察内容を元に以下のセルオートマトンを製作した。蒸気膜崩落及び物体表面温度をそれぞれ  $S_i^t$ ,  $T_i^t$  で表現し、物体表面における蒸気膜状態遷移・温度の変化を予測する。状態表現セルを図 3 に示す。蒸気膜の状態を図 3(i) に示すノイマン近傍で定義し、物体温度は(ii) で示すムーア近傍にて定義する。流体温度は焼入冷却剤温度として一定とする。この際、遷移方程式を

$$\text{状態変化: } S_0^t = 0 \text{ かつ } \sum_i S_i^t \geq b \text{ かつ } T_0^t \leq T_b \text{ ならば } S_0^{t+1} = 0, T_0^{t+1} = T_0^t - \alpha \quad \dots \text{式(1)}$$

$$S_0^t = 1 \text{ かつ } \sum_i S_i^t \geq c \text{ かつ } T_0^t \leq T_c \text{ ならば } S_0^{t+1} = 2, T_0^{t+1} = T_0^t - \beta \quad \dots \text{式(2)}$$

$$\text{温度変化: } T_0^{t+1} = T_0^t + \left\{ \frac{1}{6}(T_1^t + T_2^t + T_3^t + T_4^t) + \frac{1}{12}(T_5^t + T_6^t + T_7^t + T_8^t) - k \cdot T_e \right\} \quad \dots \text{式(3)}$$

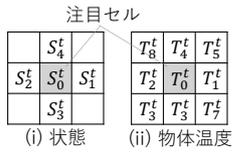
で定義した。ここで、 $\alpha, \beta$ : 潜熱の影響,  $b, c$ : 周囲のセルの影響,  $T_b, T_c, k$  は図 4 の通り。尚、蒸気膜破断起点となる部位を定義する為、破断が起こりやすいとされているエッジ部では  $b$  を小さくする。

蒸気膜崩落の繰り返しバラツキ原因の探るため、円筒部品の焼入れの様子を観察した。3000FPS の動画より 1 コマを切り出し確認した結果、図 5 に示すように蒸気膜が振動していることが見て取れた。蒸気膜の振動は液体が物体表面に局部的に接触する原因となるため、これを再現して蒸気膜崩落のバラツキを再現する事を行った。

蒸気膜振動を表すため、

$$\text{波動方程式: } \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta u \quad \dots \text{式(4)}$$

を定義した。ここで  $v$  は波の位相速度,  $u$  は膜の振動(蒸気膜厚みの変化)である。



$S_i^i$ : 相 0: 蒸気膜段階  
1: 沸騰段階  
2: 対流段階  
 $T_i^i$ : 各点の温度

t: 時刻  
i: 場所

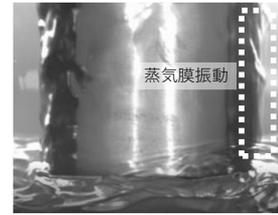
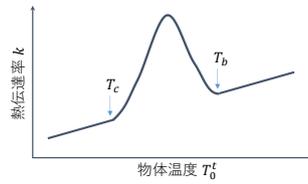


図3 状態表現セルの定義

図4 基礎熱伝達率の定義

図5 蒸気膜振動の様子

作成したセルオートマトンの実用性を検証する為、①JIK K2242 試験片での油焼入れの評価結果の再現を試みた。結果を図6に示す。実験結果とセルオートマトンによる計算結果は良く一致し、本手法の確からしさが検証できた。

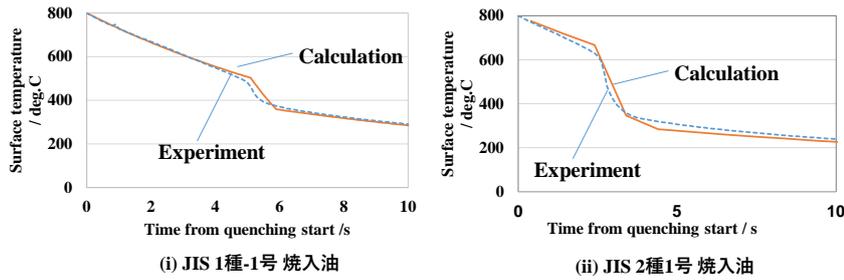


図6. JIS K2242 方の実験結果と開発手法の結果

次に図7で示す条件にて油槽内の流体流れを考慮した物、考慮しない物の焼入状態解析を試みた。流体解析と本セルオートマトンを図8内に示す TotalPressure を仲立ちに組み合わせた結果、図8に示す様に蒸気膜の崩壊の様子は流れがある場合と流れが無い場合で変化した。この結果を考慮する事で熱処理変形は図9の様に実際の実験と類似した結果に再現された。

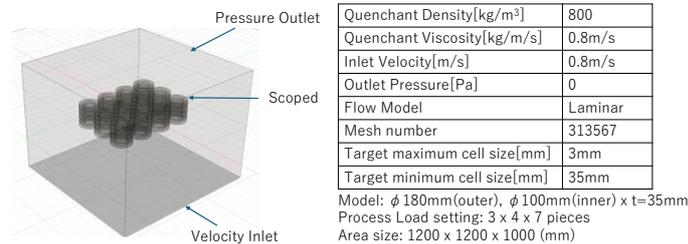


図7 解析した集団焼入条件

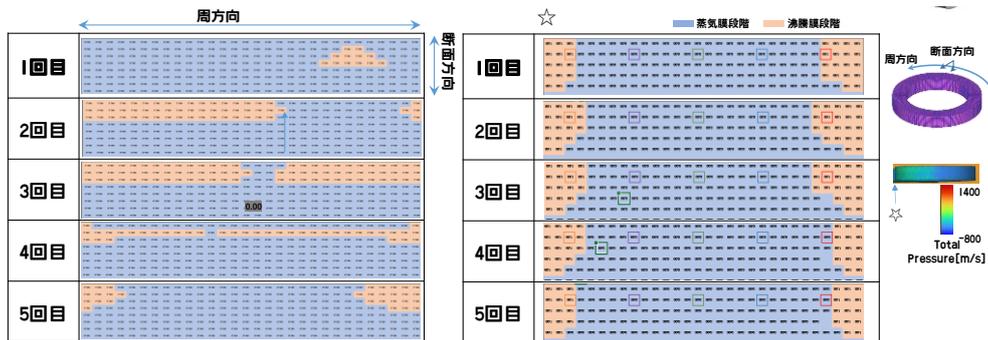


図8 集団焼き入れでの蒸気膜崩壊 左 流れ非考慮(0m/s 仮定), 右流れ考慮(図7条件)

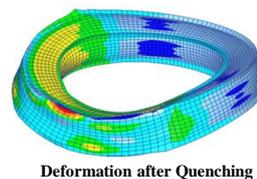
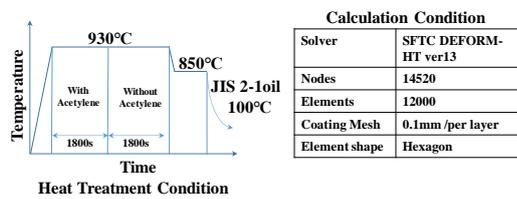


図9 焼入変形解析結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsuyoshi Sugimoto	4. 巻 13
2. 論文標題 Visualization of Vapor Film Collapse Behavior with Complexity on Quenching Process by Cellular Automaton	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics Engineering and Automation	6. 最初と最後の頁 7-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17265/2159-5275/2023.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Sugimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Visualization of vapor film collapse mode during unsteady boiling on oil quenching by using cellular automaton simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 27th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 杉本 剛、園部 勝、高野 直樹、田村 茂之、木島 秀弥	4. 巻 64
2. 論文標題 浸炭油焼入れシミュレーションにおける熱伝達率分布の影響評価とその改善	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 熱処理	6. 最初と最後の頁 45～52
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14940/netsushori.64.45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Sugimoto	4. 巻 64
2. 論文標題 Visualization of unstable vapor film collapse and quenching deformation by Cellular Automaton Simulation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 NETSU SHORI Special Issue of 28th IFHTSE Congress	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tsuyoshi Sugimoto
2. 発表標題 Visualization of vapor film collapse mode during unsteady boiling on oil quenching by using cellular automaton simulation
3. 学会等名 27th IFHTSE CONGRESS & EUROPEAN CONFERENCE ON HEAT TREATMENT 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本剛, 稲垣颯馬
2. 発表標題 セルオートマトンを用いた焼入変形シミュレーションとその検証
3. 学会等名 日本熱処理技術協会 2021秋季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuyoshi Sugimoto
2. 発表標題 Modeling of Variation on Oil Quenching with Iterative Treatment Using Cellular Automaton
3. 学会等名 28th IFHTSE CONGRESS & EUROPEAN CONFERENCE ON HEAT TREATMENT 2022 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉本剛
2. 発表標題 セルオートマトンを用いた集団荷姿 での熱処理変形の再現
3. 学会等名 日本熱処理技術協会 2024春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉本剛
2. 発表標題 熱処理シミュレーションによる 熱処理繰り返しばらつき再現
3. 学会等名 熱処理技術協会2023 春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsuyoshi Sugimoto
2. 発表標題 Visualization Method for Vapor Film Collapse Mode on Liquid Quenching in Group Processing
3. 学会等名 29th IFHTSE WORLD CONGRESS 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉本剛
2. 発表標題 CASE時代が進む自動車とものづくりの進化
3. 学会等名 2023年度切削・熱処理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Complexity Simulation for Vapor Film Collapse  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/2023/05/04/complexity-simulation-for-vapor-film-collapse-by-qcca/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/2023/05/04/complexity-simulation-for-vapor-film-collapse-by-qcca/</a>  Complexity of Vapor Film Fracture Mode  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/</a>  Vapor film collapse mode estimation tool QCCA  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/page/2/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/page/2/</a>  Quenching of long bar with keyway  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/page/2/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/page/2/</a>  Bending of Shaft Shape  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/page/3/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/category/research/page/3/</a>  Cell_Automaton_Simulation  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/2022/04/15/cell_automaton_simulation/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/2022/04/15/cell_automaton_simulation/</a>  Temperature Fluctuation  <a href="http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/2022/03/22/temperature-fluctuation/">http://j-apricot.ddo.jp/asahikawa/index.php/2022/03/22/temperature-fluctuation/</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------