

## 研究ノート

## 熱処理 CAE における各種パラメータの検証

永縄勇人\*1、津本宏樹\*1、廣澤考司\*1、花井敦浩\*1、藤波駿一朗\*1、戸谷晃輔\*1

## Verification of Various Parameters in Heat-Treatment CAE

Hayato NAGANAWA\*1, Hiroki TSUMOTO\*1, Koji HIROSAWA\*1,  
Atsuhiko HANAI\*1, Shunichiro FUJINAMI\*1 and Kosuke TOTANI\*1

Industrial Research Center\*1

熱処理 CAE の各種パラメータを文献と実験から簡易的に同定する手法を確立した。パラメータについては文献値及び実験との比較で取得し、近似モデルも活用した。実験にはジョミニ試験と部分水冷試験を行い、サーモグラフィを用いて冷却速度を測定した。算出したパラメータを用いて解析することで、組織及び冷却挙動を予測できることを確認した。

## 1. はじめに

近年、熱処理条件を予測するための熱処理 CAE が市販され始めたが、熱処理 CAE では温度変化(熱解析)やそれに伴う相変態(相変態解析)の少なくとも 2 つを連成解析する必要があり、多くのパラメータの設定が求められる。また、組織ごとに設定しつつ、温度依存性も考慮しなければならないことから、同定が非常に困難である。

本研究では、熱処理 CAE において重要な相変態解析と熱解析に注目し、実験と CAE の比較から必要なパラメータを検証することで、各パラメータを同定した。

## 2. 実験方法

## 2.1 実験及びパラメータ同定の流れ

熱処理 CAE 解析を行うに当たり、まず相変態解析に必要な変態速度論<sup>1),2)</sup>を検証し、各組織に応じたモデル式及び係数の算出を行った。次に、熱解析に必要なパラメータの同定を行うため、規格化された試験であるジョミニ試験を行い、材料物性値である密度、熱伝導率、比熱、潜熱を同定した。自然対流による水冷を表現する熱伝達率については、部分水冷試験を行うことで算出した。

## 2.2 ジョミニ試験

図 1 に示すような JIS G 0561 に準じた冷却試験を行い、サーモグラフィを用いて部位ごとの冷却曲線を測定した。冷却試料については機械構造用炭素鋼(S25C~S55C)を用い、放射率が一定となるよう黒体スプレーを塗布して試験を行った。

## 2.3 部分水冷試験(自然対流による水冷)

図 2 に示すように加熱した機械構造用炭素鋼を十分な水の中に部分的に浸漬し、2.2 項と同様の方法で大気中

に暴露している部位の冷却曲線を測定した。

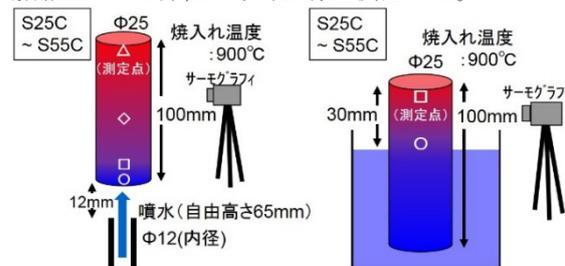


図 1 ジョミニ試験の概要図

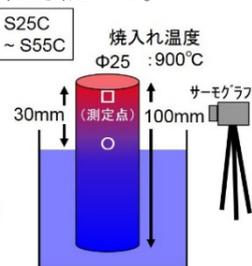


図 2 部分水冷試験(自然対流)の概要図

## 2.4 CAE 解析

CAE 解析は DEFORM(SFTC 社製)を用い、冷却による相変態解析と熱解析を行った。解析では 2 次元対称モデルを採用し、形状は実験と同じにした。要素数はパラメータ検証時では 650、実証試験時は 3000 とした。

## 2.5 実証試験(水冷焼入れ試験)

S45C(直径 50mm、長さ 50mm)を 830°C で十分に加熱し、十分な水の中に全て浸漬させて焼入れを行った。冷却後、中心を径方向に切断して断面の観察を行った。

## 3. 結果

## 3.1 相変態解析に必要なパラメータの算出

変態速度論の検証に当たり、実験結果の代わりとして物質・材料研究機構(NIMS)が公開しているデータベース(MatNavi)の連続冷却変態図(CCT 線図)を参考にした。無拡散変態するマルテンサイトには Magee の式<sup>3)</sup>、それ以外の拡散変態する組織については Johnson-Mehl の式<sup>4)</sup>を用い、各係数も同時に算出した。

## 3.2 熱解析に必要なパラメータの算出

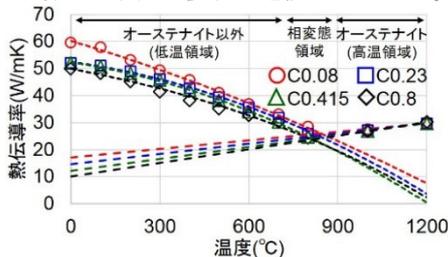
熱解析に必要なパラメータは非常に多く、ジョミニ試

\*1 産業技術センター 金属材料室

験との比較で全てを同定することは困難であるため、文献値や近似モデル式も活用した。

まず、密度については、組織で大きく値が異なり、それぞれに応じた文献も少ないため、Miettinen の計算式<sup>5)</sup>を用いて各組織の密度を近似して算出した<sup>1)</sup>。

熱伝導率については、**図 3** に示すとおり金属便覧<sup>6)</sup>を参考にした。熱伝導率は化学成分や組織によって大きく影響を受けるが、フェライトとマルテンサイトを比較した場合、比較的似た物性を示すことが知られている<sup>7)</sup>。そのため、高温領域の組織であるオーステナイトと低温領域の組織であるオーステナイト以外の 2 つに分け、それぞれを最小二乗法で多項式近似して用いた。



**図 3** 炭素鋼の熱伝導率

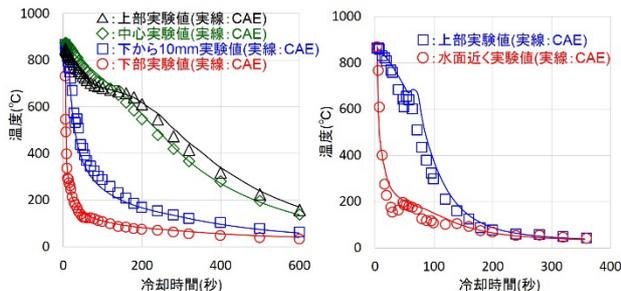
比熱については、オーステナイト以外は以下の式で表される Neumann-Kopp の法則を用いて算出した<sup>8)</sup>。

$$c = (A + BT + CT^2) / Mw$$

c: 比熱(J/g・K)、Mw: 分子量(g)、T: 温度(K)、  
(A, 10<sup>2</sup>B, 10<sup>5</sup>C): Fe(α)(17.5, 2.48, 0), Si(24.2, 0.23, -4.56),  
Mn(23.9, 1.42, -1.57), Fe<sub>3</sub>C(82.2, 8.37, 0)

この理由としては、鋼の比熱は電子や磁気、変態の影響によって正確な値を測定することが難しく、文献によって値が大きく異なるからである。次にオーステナイトの比熱については、ジョミニ試験によって合わせ込み変数として扱った。これは文献値や Neumann-Kopp の法則では後述の CAE 解析結果と合致しなかったためである。また、潜熱についても同様であり、Neumann-Kopp の法則では電子や磁気、変態を表現することができないため、これらの影響は全て潜熱に合算させ、ジョミニ試験結果と合致するよう変数として合わせ込みを行った。

熱伝導率については、ジョミニ試験では奈良崎等によって算出された文献値を用い<sup>9)</sup>、自然対流による水冷



**図 4** ジョミニ試験の冷却曲線

**図 5** 部分水冷試験(自然対流)の冷却曲線

の熱伝導率については、同定した全パラメータを基にして部分水冷試験と比較して算出した。

### 3.3 各冷却試験と CAE 解析の比較

算出したパラメータを用いて相変態解析と熱解析を連成解析し、各冷却試験結果と比較したところ(**図 4**、**図 5**)、ジョミニ試験及び部分水冷試験の冷却挙動を精度よく再現することができた。

### 3.4 実証試験と CAE 解析の比較

**図 6** に実証試験用の焼入れ試料の断面と、同条件で CAE 解析した結果を示す。本来であればこの形状に合わせた熱伝導率を用いる必要があるが、形状が上記試験と似ているため、部分水冷試験で算出した熱伝導率を用いた。結果、マルテンサイトの臨界生成位置と CAE 解析での変化位置が一致しており、CAE に対する今回のパラメータの妥当性を確認できた。



**図 6** 実証試験と CAE 解析の比較

## 4. 結び

本研究では、簡易的な冷却試験を用いて熱処理 CAE のパラメータを検証した。結果は以下のとおりである。

- (1) 試験方法が規格化されており、文献も豊富なジョミニ試験を利用することで、熱解析に必要なパラメータである材料物性値の合わせ込みができた。
- (2) 同定した全パラメータを用いて実験と比較することで、様々な冷却条件の熱伝導率も算出可能となった。
- (3) CCT 線図を用いて合わせ込みを行った変態速度論により、熱処理による組織の予測も可能とわかった。

## 文献

- 1) 岡村一男: 材料, **55**(5), 529(2006)
- 2) 巨東英: 材料, **55**(7), 712(2006)
- 3) C.L.Magee: ASM, Chap.3, 115(1968)
- 4) W.A.Johnson, R.F.Mehl: *Transactions of AIME*, **135**, 416(1939)
- 5) J.Miettinen: *Metallurgical and Materials Transactions B*, **28B**, 281(1997)
- 6) 日本金属学会: 金属便覧, 286(1964), 丸善
- 7) 遅沢浩一郎: 腐食センターニュース, No.48002
- 8) 日本金属学会: 金属便覧, 24(1964), 丸善
- 9) M.Narazaki, M.Kogawara, A.Shirayori, S.Fuchizawa: Proc. of 4th Int. Conf. on Quenching and Control of Distortion in Beijing, P97-104, 20-23 May 200