

研究論文

熱処理 CAE を用いたレーザー焼入れのモデル化

永縄勇人*1、津本宏樹*1、廣澤考司*1、花井敦浩*1、藤波駿一郎*1、戸谷晃輔*2

Modeling of Laser Hardening by Heat-Treatment CAE

Hayato NAGANAWA*1, Hiroki TSUMOTO*1, Koji HIROSAWA*1,
Atsuhiko HANAI*1, Shunichiro FUJINAMI*1 and Kosuke TOTANI*2

Industrial Research Center*1*2

市販の熱処理 CAE を用いてレーザー焼入れのモデル化を検討した。レーザーによる入熱を熱流束とみなしパラメータを入力することで、CAE によるレーザー焼入れの模擬が可能となった。レーザー出力と熱流束の関係を調査した結果、CAE 上での熱流束値とマルテンサイト生成深さの相関からレーザー出力に対する入熱率を導き、補正することでレーザー出力や走査速度に対して高い精度で焼入れ深さや硬度予測が可能となった。

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、市販熱処理 CAE ではレーザー焼入れの解析モジュールは未だ導入されておらず、レーザー照射条件の検証がコンピュータ上ではできなかった。

著者らはこれまでに、レーザー照射条件がレーザー焼入れに及ぼす影響に関する研究^{1)~3)}や熱処理 CAE のパラメータ同定に関する研究を行ってきた⁴⁾。本研究では、レーザー照射面の境界条件として熱流束を設定することで、レーザー焼入れの CAE 解析を試みた。さらに、焼入れ深さや硬度予測の高精度化のため、レーザー出力と入熱率の相関を調査し、より簡易的にパラメータを補正する手法について検討した。過去に著者らが行った実験結果^{1)~3)}と CAE 解析結果を比較することで本手法の有効性を検証した。

2. 実験方法

2.1 レーザー焼入れ

過去に著者らが行った実験条件の概略を記す。詳細な条件は参考文献^{1)~3)}を参照されたい。

2.1.1 供試材

本実験に使用した供試材は、表面をフライス加工したビッカース硬度 230HV の機械構造用炭素鋼(S50C)であり、形状を 50×50×10mm とした。

2.1.2 レーザーシステム

レーザーは、最大出力 4000W のディスクレーザー(Trumpf 社)を使用した。レーザーの媒質には Yb:YAG ディスクが使われており、波長は 1030nm である。レーザー

光は焦点距離 320mm で 15×1mm のライン状に成形されており、レーザーの焦点位置と試験片表面は同一とした。

2.1.3 照射条件

レーザー照射は大気雰囲気下で行い、走査速度は 200-600mm/min、レーザー出力は 700-2000W に制御した。供試材はバイスを用いて側面を固定し、レーザー照射面と裏面には接触物がない状態とした。

2.2 CAE 解析

2.2.1 熱処理 CAE

CAE 解析は DEFORM(SFTC 社製)を用いた。解析では 2 次元平面ひずみモデルを用い、形状は実験と同じにした。要素数は 26220 とし、表面から 2mm 以上深い位置に対して表面から 1mm 位置まではメッシュサイズが 1/20 になるように設定し、1mm 位置から 2mm 位置までは 3/20 になるようにした。

レーザーによる入熱を CAE 上では熱流束としてみなしたため、**図 1**に示すようにモデルを構築し、レーザー照射部位は熱流束境界、他の部位は熱伝達境界とした。熱流束境界はレーザー走査速度を模擬して動かし、実験条件と同様に両端 10 mm を除いた領域を移動させた。

2.2.2 解析パラメータ

(1) 相変態解析

解析する相は、(a)フェライト相とパーライト相の混相(FP 相)、(b)ベイナイト相(B 相)、(c)マルテンサイト相(M 相)、(d)オーステナイト相(A 相)とし、初期の状態は FP 相を 100%とした。相変態は、加熱工程では FP 相から A 相への変態、冷却工程では A 相から FP 相、B

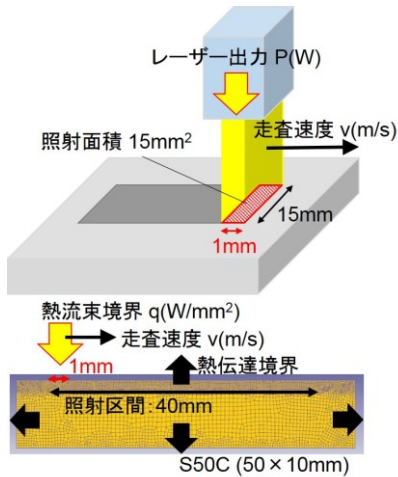


図1 実験の概略図(上)と解析モデル(下)

相、M相への変態として解析した。拡散変態であるFP相からA相への変態は、KJMA式(Kolmogorov-Jonson & Mehl-Avrami equation)⁵⁾を拡張した式(1)により与え、温度 T における変態率 ξ_A を算出した。なお、 A_{c1} 点と A_{c3} 点は邦武の計算式⁶⁾を用いた。

$$\xi_A = 1 - \exp\left\{-4 \left(\frac{T - A_{c1}}{A_{c3} - A_{c1}}\right)^2\right\} \quad (1)$$

同じく拡散変態であるA相からFP相およびB相への変態は、KJMA式である式(2)により与え、時間 t における変態率 ξ_{FP} 、 ξ_B を算出した。式中の k 、 n は温度依存の材料物性値のパラメータであり、等温変態線図(TTT線図)より求めることができる。

$$\xi = 1 - \exp(-kt^n) \quad (2)$$

しかしながら、TTT線図は等温変態時における状態変化のため、多くの文献でも報告されているとおり現実の冷却時の変態とはあまり即していない。そこで、より現実に即した変態を表す連続冷却変態線図(CCT図)を参考にし、図2に示すTTT線図を逆計算により求めた。なお、本研究では物質・材料研究機構(NIMS)が公開しているデータベース(MatNavi)を利用した。

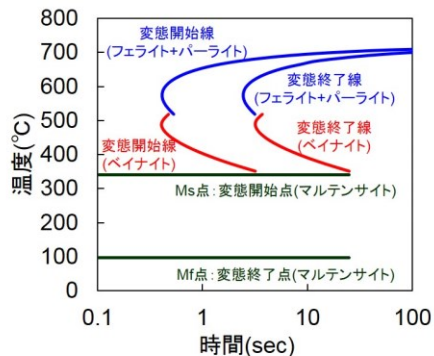


図2 CCT線図を基に算出したTTT線図

無拡散変態であるA相からM相への変態については、Mageeの式⁷⁾を熱力学的考察によって修正した式(3)により与えた。

$$\xi_M = 1 - \exp(\varphi_1 T - \varphi_4) \quad (3)$$

本来、式(3)は応力及び炭素濃度の影響を表す項も含むが、本研究では変態率 ξ_M を温度のみに依存した関数として省略し、図2に示す M_s 点と M_f 点より φ_1 と φ_4 を算出した。なお、変態率 ξ_M は式(4)のKoistinen-Marburgerの式⁸⁾を用いた解析もよく行われているが、上記CCT線図にうまく合致しなかった。そのため、 ξ_M も ξ_{FP} と ξ_B 同様にCCT線図に合致するよう逆計算して式(3)を用いた。

$$\xi_M = 1 - \exp\{-0.011(M_s - T)\} \quad (4)$$

(2) 熱解析

熱解析に必要な物性値のパラメータは多く、(a)密度、(b)熱伝導率、(c)比熱が少なくとも必要であり、より精度を上げるためには(d)潜熱も考慮する必要がある。また、各相によってもこれら物性値は変わるとともに、温度の依存性も存在する。著者らはジョミニ試験を応用することで簡易的にこれらパラメータを同定する手法⁴⁾を報告しており、本研究ではその手法を用いて算出した値を用いた。図3から図5および表1にそれら物性値をまとめる。

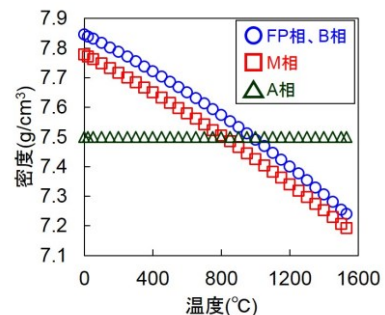


図3 算出したS50Cの密度

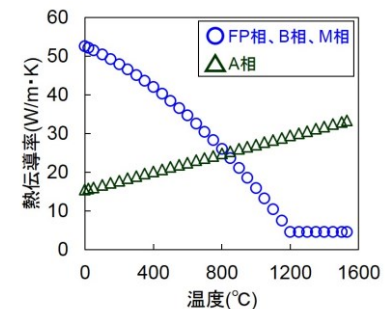


図4 算出したS50Cの熱伝導率

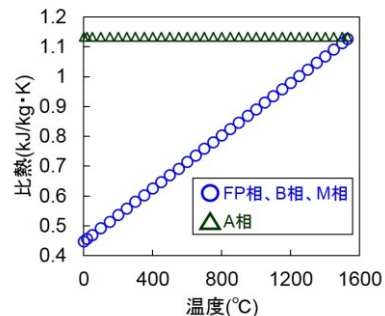


図5 算出したS50Cの比熱

表 1 算出した S50C の潜熱

FP相→A相	A相→FP相	A相→B相	A相→M相
-158kJ/kg	158kJ/kg	158kJ/kg	156kJ/kg

熱処理 CAE ではしばしば熱伝達率の設定が問題となるが、レーザー焼入れは入熱した熱が直ちに母材に拡散して急冷するため、熱伝達境界が冷却に与える影響は非常に小さい。本研究では、DEFORM デフォルト値を参考にし、空気に対しては $20\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、パイスとの接触部に対しては $5000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ を設定した。

(3) 硬さ解析

硬さ解析には、JIS G 0561 によるジョミニ試験により取得したパラメータを用いる必要がある。しかし、一般的に求められる冷却部からの距離と硬さの関係だけでなく、冷却部からの距離と冷却速度の関係も必要であり、硬さ解析を行うためには冷却速度の測定も必要となる。著者らが見出した同定手法⁴⁾では、CAE 解析によってジョミニ試験を模擬することにより、冷却部からの距離に対する冷却速度の関係を算出することが可能である。

図 6 にジョミニ試験と解析によって算出した硬さ値および冷却速度を示す。なお、冷却速度については、 700°C から 500°C の間で求めた。

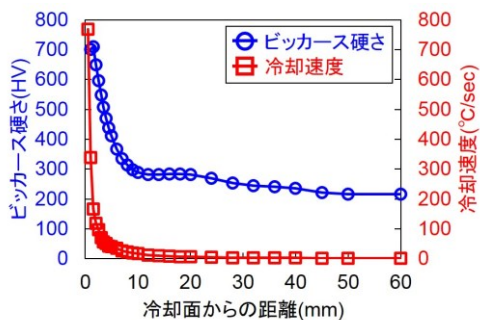


図 6 ジョミニ試験による硬さ値と解析により算出した冷却速度

3. 実験結果及び考察

3.1 熱流束境界によるレーザー焼入れのモデル化

図 1 のモデルに熱流束境界を用いて CAE 解析を行った結果を図 7 に示す。CAE 解析結果はマルテンサイトの体積分率を色で示している。著者らが過去に行った組織観察結果^{1)~3)}と同様に表面部位のみがマルテンサイト化している様子が再現できている。また、図 8 にレーザー

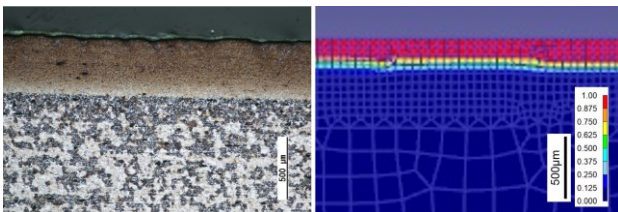


図 7 実験による組織観察結果(左)と CAE 解析によるマルテンサイトの体積分率(右)

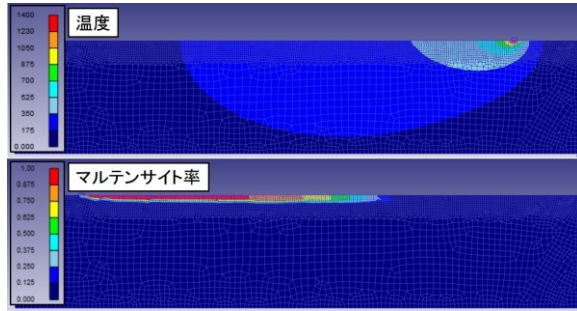


図 8 レーザー照射途中の CAE 解析結果

照射途中時点の解析結果を示すが、レーザー照射部から遅れてマルテンサイトが生成している様子も再現でき、任意の時点の様子も確認できる。しかし、実験条件から換算した熱流束境界条件を入力しても焼入れ深さは一致せず、入熱率の影響を考慮しなければならないことがわかった。

3.2 レーザー出力と熱流束境界条件の関係

マルテンサイトの生成深さに関して、最高到達温度が融点を大きく超えない範囲で解析した CAE 解析結果と実験からそれぞれ求めた結果を図 9 に示す(走査速度: 300mm/min)。レーザー出力の増大とともに焼入れ深さが一定値に漸近していく実験結果と異なり、CAE 上では一次関数的な相関がみられた。また、硬さに対応するそれぞれの熱流束境界条件やレーザー出力にも大きく乖離がみられることがわかった。

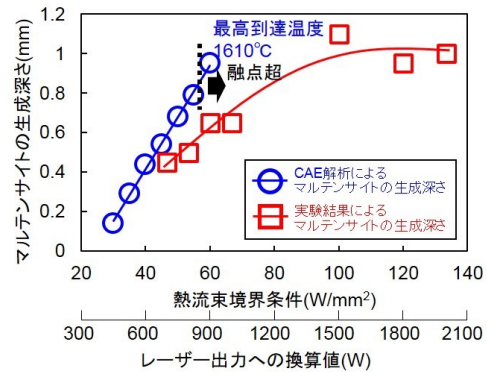


図 9 熱流束境界条件(CAE)およびレーザー出力(実験)とマルテンサイトの生成深さの関係

この結果を基にレーザー出力と熱流束境界条件の比を入熱率と定義し、近似した CAE 解析結果とマルテンサイト生成深さの実験値が一致する点の入熱率を図 10 に示す。レーザー出力に対する入熱率は一次関数的に減少しており、レーザー出力に入熱率を補正した場合、高出力領域では熱流束境界条件は同程度の値に漸近していく。

今回、入熱率を定義して補正手法としたが、この入熱率と理想的な鉄の吸収率は異なっている。理想的な鉄の吸収率は 35%程度(波長 1000nm 時)であり、温度依存性も大きくないとされている⁹⁾。しかし、実際には表面粗さや化学状態によってもこれら数値は影響を受け、レー

レーザー照射時にもリアルタイムで変化していく。これらが複雑に絡み合った結果がレーザー出力と入熱率の関係として表れているため、この数値が真の値ではないと注意が必要である。また、メッシュ数などの解析条件によっても大きく影響を受けるため、予め予備実験で実環境にあった入熱率を算出することが重要である。

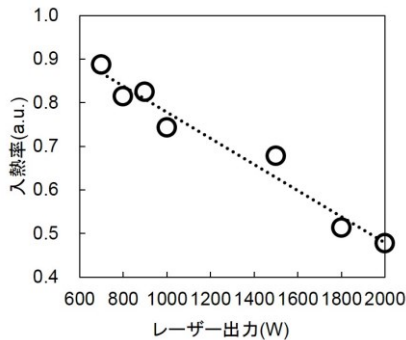


図 10 レーザー出力に対する入熱率の関係

求めた入熱率を考慮して CAE 解析を行った結果を図 11 に示す。このことから、入熱率により補正することでレーザー出力や走査速度が異なる条件でも、マルテンサイトの生成深さを高精度に予測できることがわかった。また、高出力でレーザー焼入れを行った場合、組織観察により溶融跡を確認した。そのときの条件を CAE 解析すると、最高到達温度が融点を超えており、実験をうまく模擬できていることがわかった。しかし、走査速度の差が大きい場合は精度の悪化がみられたため、より高精度の解析を行うためには、走査速度に応じた入熱率を算出した方が望ましいことがわかった。

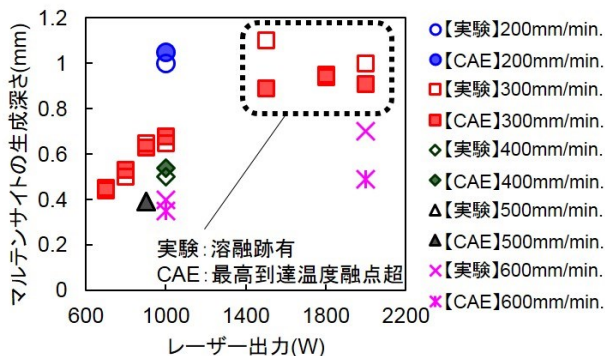


図 11 入熱率によって補正した CAE 解析結果

3.3 硬さ解析

レーザー出力 1000W、走査速度 600mm/min の条件について入熱率で補正して硬さを解析した結果を図 12 に示す。表面近傍の焼入れ硬さを精度よく予測できており、軟化が始まる点や有効硬化層 (JIS G 0559 を参考に 450HV とした) も一致している。ジョミニ試験の硬さと冷却速度を基に硬さを解析していることから、冷却速度の基準温度まで加熱されていない領域では硬さをうまく算出できていない問題もあるが、母材硬さに到達する全

硬化層の位置までは正確に予測ができています。相変態解析結果が一致している条件であれば、高精度な硬さの予測が可能であると他のレーザー照射条件でも検証ができていたため、入熱率に関する補正を活用すれば、最適なレーザー照射条件も解析していくことが可能である。

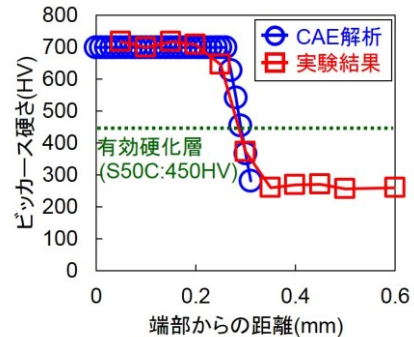


図 12 CAE による硬さ解析結果

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) レーザーを熱流束とみなして CAE にパラメータ入力することで、市販熱処理 CAE でレーザー焼入れ解析が可能となった。
- (2) 熱流束値とマルテンサイト生成深さの相関からレーザー出力に対する入熱率を定義し、レーザー出力を補正することで、高精度な解析が可能となった。
- (3) 相変態解析結果が一致している条件であれば、焼入れ硬さや有効硬化層、全硬化層位置など、硬さの予測も高精度に可能であることがわかった。

文献

- 1) 津本宏樹, 古澤秀雄, 斉藤昭雄, 花井敦浩: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **2**, 44(2013)
- 2) 津本宏樹, 清水彰子, 横山博, 花井敦浩: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **4**, 22(2015)
- 3) 津本宏樹, 清水彰子, 横山博, 花井敦浩, 古澤秀雄: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **5**, 28(2016)
- 4) 永縄勇人, 津本宏樹, 廣澤孝司, 花井敦浩, 藤波駿一郎, 戸谷晃輔: あいち産業科学技術総合センター研究報告, **12**, 34(2023)
- 5) W.A.Johnson, R.F.Mehl: *Transactions of AIME*, **135**, 416(1939)
- 6) T. Kunitake: *Journal of the Japan Society for Heat Treatment*, **41**, 3, 164(2001)
- 7) C.L.Magee: *ASM*, **3**, 115(1968)
- 8) D.P.Koistinen, R.E.Marburger: *Acta Metallurgica*, **7**, 59(1959)
- 9) 大野二郎: 計測自動制御学会論文集, **14**, 3, 283(1978)