焼入れシミュレーションの現状と展望

2. 冷却特性とデータベース[†]

奈良崎 道 治*

Actuality and Scope on Simulation of Heat Treatment

II : Cooling Characteristics and Database

by

Michiharu NARAZAKI*

Key words : Quenching, Quenchant, Cooling characteristics, Cooling power, Heat transfer coefficient, Database

1 はじめに

鋼部品の焼入れにおいては、焼入れ後の硬さ不足や硬さむら（焼ムラ）あるいは焼割れなどの熱処理欠陥発生を防止し、焼入変形とそのばらつきを抑制することが必要とされる。そのための最適熱処理条件の選択は、これまで熟練技術者の経験や試行錯誤による実験の繰り返しによって行われ、その結果が現場のノウハウとして蓄積されてきた。しかし、最近の熟練技術者、技能者の減少に加えて、試行錯誤で最適な熱処理条件を設定するには多くの手間と時間とコストがかかるため、近年は、熱処理の分野においてもシミュレーションによって問題点を事前に予測し、試行回数を減らすことによる開発時間の短縮とコスト削減を実現することが要求されている。¹⁾

以上のような背景から、現在では数種の熱処理シミュレーション専用ソフトウェアが開発され市販されている。これらを使用して実際にシミュレーションを実施するには、解析対象となる鋼部品の材料特性データが必要であり、加えて加熱冷却プロセスを解析するための熱的表面境界条件を設定することが必要である。焼入急冷時の熱的表面境界条件としては部品表面の熱伝達率を表面温度依存として設定することが一般的である。しかし、実際の鋼部品焼入れ時の熱伝達率を求めることはかなり困難であるので、一般には円柱などの単純形状を有する標準試片を焼入れした際の冷却曲線を実測することで冷却剤の冷却能の把握や焼入れ時の表面熱伝達率の同定が行われる。²⁾ だし、焼入れシミュレーションの精度を向上させるには、実際の鋼部品の焼入れした際の冷却曲線を実測して表面熱伝達率を求めることが望ましい。³⁾ いずれにしても、焼入れされる試片や実部品の冷却曲線を実測して熱伝達率を同定する作業は非常に手間がかかり、実際には冷却曲線の実測すら困難な場合が多いので、焼入れシミュレーションを実施する際の大きな障害となっている。

以上のことから、焼入れシミュレーションを実施する際に、焼入剤の冷却性能や熱的表面境界条件として与える表面熱伝達率のデータベースの必要性が生じるが、残念ながら種々の焼入冷却剤の冷却能データが整理集約されたデータベースとして公開あるいは販売されているものは見当たらない。そこで、本講座では、熱処理シミュレーションに必要な焼入れ時の冷却特性の測定法と表面熱伝達率の同定方法について解説するとともに、そのデータベース化の現状について紹介する。

2 焼入冷却剤の冷却能と冷却特性

従来、熱処理用冷却剤としては水、各種の水溶液、油等の沸騰性のもの、熔融ソルト、熔融金属、不活性ガスなどの非沸騰性のもの、およびこれらの混合したものが用いられてきた。非沸騰性冷却剤の冷却は対流伝熱によって生じるニュートン冷却であるが、沸騰性冷却剤の冷却段階は基本的に蒸気膜段階→沸騰段階（核沸騰段階）→対流段階と変化し、それによっても冷却速度は緩→急→緩の順に大きく変化する。

沸騰性冷却剤を用いて急冷を行う際には、処理物表面に形成される蒸気膜の崩壊挙動が冷却特性を大きく左右する。蒸気膜は冷却液と処理物表面との直接接触を妨げ、かつ熱伝導率の小さい蒸気膜が熱移動を阻害するから、蒸気膜段階の冷却速度は小さい。蒸気膜が崩壊して固液接触が起こると激しい沸騰による急冷（クエンチング）が起こる。したがって、蒸気膜崩壊が起こる温度すなわち特性温度（またはクエンチ温度）は、冷却液の冷却能を左右する重要な特性値である。

さらに重要な点は、クエンチ温度における蒸気膜の崩壊挙動である。一般に、蒸気膜は処理物のエッジ部など、表面温度の低い部分から伝播的に崩壊する。この伝播的崩壊が処理物表面の冷却むら（サーフェス・ムラ）を引き起こす。⁴⁾ サーフェス・ムラは、表面と内部との冷

[†] 原稿受理 平成 17 年 10 月 19 日 Received Oct. 19, 2005

* 正 会 員 宇都宮大学工学部機械システム工学科 〒321-8585 宇都宮市陽東, Dept. of Mech. Systems Eng., Utsunomiya Univ., Yoto, Utsunomiya, 321-8585

却差（ボディ・ムラ）と共に焼入応力すなわち熱応力や変態応力の発生原因であり，過大な焼入応力によって起こる焼割れや焼入変形を引き起こす原因となる．このようなサーフェス・ムラを少なくする方法としては，冷却剤の攪拌や噴射などによって蒸気膜を強制的に崩壊することが有効である．

3 焼入冷却剤の冷却能評価法と熱伝達率同定

3・1 焼入冷却剤の冷却能評価法

熱処理油の冷却能測定法としては，銀棒試片（図1(a)）の冷却曲線測定による JIS 法（JIS K 2242），インコネル合金棒試片による ISO 法（ISO/DIS 9950）が国家規格および国際規格として制定されている．しかし，これらの対象は熱処理油のみであり，他の冷却剤の冷却能測定法についての規格は定められてはいない．現在は，JIS 法と ISO 法をそのままガス以外の冷却剤に準用しているが，すでに水溶性焼入液の冷却能測定法については JIS 法（JIS K 2242）に新規に測定法の規格が追加されることが決定されている．また，ポリマー焼入液のような水溶性冷却剤の冷却能は油と比べて攪拌による影響が非常に大きいので，油のような攪拌なしでの冷却能測定では実際の冷却能を把握できないとの考えから，攪拌槽を用いた方法についての検討が進められている．

冷却曲線測定結果から，冷却能を定量的に表示する方法としては以下の方法が用いられる．

- 1) 冷却曲線と特性値〔特性温度（クエンチ温度），特性秒数，冷却速度の代表値など〕による方法
- 2) 冷却速度曲線による方法
- 3) 冷却母曲線による方法
- 4) H 値による方法（Grossmann number）
- 5) 熱伝達率曲線，又は沸騰特性曲線（表面熱流束曲線）による方法

これらの方法は，それぞれ以下のような特徴を持つ．すなわち 1)，2) は冷却曲線測定に用いる試片の寸法や材質に依存するので一般性が少ない．3) は試片の寸法や材

質を考慮して，ある程度の一般性を持たせている．

4) の方法，すなわち H 値による方法は鋼部品の焼入れにおいては，焼入れ時の急冷度（Quenching severity）の目安として古くから用いられてきた．⁵⁾ H 値（ H value, Grossmann number）は次式で定義される．

$$H = \frac{h}{2\lambda} \quad (1)$$

ここで λ は焼入れされる金属の熱伝導率であり， H 値は冷却される金属の熱伝導率 λ で熱伝達率 h を除した値の 1/2 に等しい．なお， H 値に焼入れされる金属部品の代表寸法をかけると，その積は Biot 数（ Bi ）となる．

$$Bi = HD = \frac{hD}{2\lambda} = \frac{hR}{\lambda} \quad (2)$$

ここで D と R （ $= D/2$ ）はそれぞれ円柱部品や球部品の直径と半径，あるいは板部品の厚さとその 1/2 に対応する．Biot 数は表面熱伝達率と金属内部の熱伝導抵抗の大きさを比較した無次元量であり，焼入れ中の部品内温度分布の非一様性を表すパラメータと言える．しかし， H 値は冷却段階の変化を無視した単純なニュートン冷却として冷却曲線を近似した場合の平均熱伝達率を求めていることになるので，精度の良い数値シミュレーションに適用するには不相当である．

5) は試片の寸法形状・材質に依存しない最も一般性のある表示方法である．焼入れ中の金属部品からの熱除去は表面熱伝達率によって定量的に表すことができる．熱伝達率 h は，以下の式で定義される．

$$h = \frac{Q}{A(T_p - T_l)} \quad (3)$$

ここで， Q は部品から焼入剤への熱移動量， A は部品の表面積， T_p は部品表面温度， T_l は焼入剤の温度である．鋼部品の焼入れプロセスのシミュレーションを行うには，表面熱伝達率を求めることが有効である．以下の焼入れ時の表面熱伝達率を求める方法について述べる．

3・2 代表的な熱伝達率算出法

焼入れシミュレーションにおいては，焼入れされる金属表面の熱伝達率または表面熱流束を熱的表面境界条件として与えることが必須である．しかし，急冷される物体表面の温度と熱伝達率を実測することは容易ではなく，一般には試片内部の代表位置で測定した冷却曲線より近似的に求める方法か，あるいは数値解析により逆算する方法が用いられている．熱伝達率の同定を行う代表的な方法として，温度勾配測定法，定常法，集中熱容量法，逆解析法などの方法がある．表1に各同定方法の概略に示す．なお，これらの方法のうち最も一般的な方法は集中熱容量法^{6), 7)}と逆解析による方法である．図1に示した銀棒試片のように，用いる試片の寸法が比較的小さく，かつ試片材質として熱伝導の良い材質を用いている場合には，試片内部の温度分布がほぼ一様であると仮定して取り扱う集中熱容量法によって，試片中心部冷却曲線から近似的に沸騰曲線および熱伝達率曲線を求めることができる．⁷⁾以下にその詳細を述べる．

図1 各種冷却剤の熱伝達特性測定用銀円柱試片

表1 代表的な熱伝達率同定方法

名 称	同定の方法
温度勾配測定法	試片表面付近の2点の温度を測定し、その温度勾配から、近似的に表面熱流束及び表面熱伝達率を求める方法
定常法	試片表面から冷却剤への熱流出と試片内部または上方の熱源からの熱供給によって試片温度を一定に保ち、そのときの熱供給量 (= 熱流出量) の測定値から、表面熱流束及び表面熱伝達率を求める方法
集中熱容量法	試片内部の温度を一樣と仮定して、実測した冷却曲線から得られる単位時間の熱容量の変化量から表面熱流束及び表面熱伝達率を算出する近似的な方法
逆解析法	試片内部の熱伝導問題の解析と各種の逆解析的手法を利用して、内部温度の時間的変化の実測値から表面熱流束及び表面熱伝達率を求める方法

3・3 集中熱容量法

過渡冷却中の試片内部の温度分布は、試片材料の熱伝導率および試片表面から周囲流体への熱伝達条件すなわち熱伝達率に依存する。もし、熱伝導による伝熱抵抗 (内部抵抗) が表面での熱伝達による抵抗 (外部抵抗) よりも十分小さいならば、試片内部の温度分布はほぼ一様であると考えてよい。このとき、試片表面からの熱損失 Q [W] は、明らかに内部エネルギーの減少に等しいから、次式が成り立つ。

$$Q = hA(T_p - T_l) = -c\rho V \left(\frac{dT_p}{dt} \right) \quad (4)$$

あるいは、

$$q = h(T_p - T_l) = \frac{c\rho V}{A} \frac{dT_p}{dt} \quad (5)$$

ここで、 V [m³] は試片の体積、 c [J/(kg・K)]、 ρ [kg/m³] は試片材料の比熱および密度、 A [m²] は試片の表面積、 T_p 、 T_l [K] は試片と流体の代表温度、 h [W/(m²・K)] は表面熱伝達率、 q [W/(m²)] は表面熱流束、 dT_p/dt は試片の冷却速度である。

なお、試片の質量 ρV [kg] は試片温度にかかわらず一定であるが、比熱 c は冷却中に試片温度が液温まで降下するとともに変化する。そこで、ここでは比熱 c を温度の関数として与えると、

$$q = h(T_p - T_l) = -\frac{c(T_p)\rho V}{A} \frac{dT_p}{dt} \quad (6)$$

なお、熱膨張による表面積 A の変化は小さいので無視する。また、ここでは試片内部の温度分布がほぼ一様であると近似し、さらに T_l としては試片付近での液温上昇を無視してバルク液温を用いることとする。

以上より、冷却中の任意の試片温度 T_p に対して、試片の冷却速度 dT_p/dt 値が得られれば、 T_p-h および T_p-q の関係、すなわち熱伝達特性曲線および沸騰特性曲線を得ることができる。

なお、上述のような近似は通常、試片や部品の熱伝導率を λ としたときに

$$k = \frac{hV}{\lambda A} < 0.1 \quad (7)$$

が成り立つ時に有効とされる。⁶⁾ ここでの k はビオ数 $Bi = D/\lambda$ (D : 代表寸法) に相当する値であり、通常 $Bi = 0.1$ 程度で誤差が数%以下とされている。JIS 試片のような銀円柱試片を熱処理油や水溶性焼入れ液の冷却能測定に用いる場合は、 k の値が 0.1 を大きく越えることはほとんどないので、全ての冷却段階において集中熱容量法として近似的に取り扱うことが可能である。さらに相変態や表面酸化の生じない銀を試片の材料として用いることによって、それらの影響を受けない熱伝達特性を測定できるので、最も標準的なデータと考えることができる。

図2に代表的冷却剤中に焼入れした銀円柱試片 (10mm 径、30mm 長) の冷却曲線とそれらのデータより集中熱容量法によって算出した表面熱伝達特性曲線の例を示す。

3・4 逆解析法

試片寸法が大きい場合や銅部品のように熱伝導率が比較的小さい場合には、式 (7) の k の値が 0.1 よりも大きくなり、上述の集中熱容量法を適用することができない。したがって、実測した焼入れ冷却曲線データから金属試片

(a)

(b)

図2 代表的冷却剤中に焼入れした銀円柱試片 (10mm 径、30mm 長) の冷却曲線 (a) とそれらのデータより集中熱容量法によって算出した表面熱伝達特性曲線 (b)。

や銅部品の表面熱伝達率を求めるには逆解析的手法を用いる必要がある。しかし、逆解析すなわち逆問題を解く場合には以下の困難性が存在することが知られている。⁸⁾

◎「逆問題」の解析の困難性

- 1) 逆問題においては解の存在、一意性および解の安定性が必ずしも保証されない。すなわち不適切問題 (ill-posed problem) である。
- 2) 実際の逆解析においては、用いられる実測値（ここでは冷却曲線の実測値）に必ずノイズが含まれるが、実測データにおける小さな誤差が逆解析の結果に大きな誤差や解の不安定性をもたらすことが多い。

このような困難を克服するために、種々の手法（共役勾配法、カルマンフィルタ法、遺伝的アルゴリズムによる方法等）が用いられる。熱伝達率同定の逆解析においても解の一意性がなく、冷却曲線の測定値の精度やノイズに対して解が過度に敏感で安定性がない。したがって、これらの不適切性を回避して最適解を効率良く得るには、適切化手法の選択が重要であり、さらに種々の工夫が必要となる⁹⁾が有効な手法が確立されているとは言い難く、今後の更なる研究が望まれている。さらに、銅部品の焼入れにおいては、逆解析に用いる材料特性データ（比熱、密度、熱伝導率、相変態特性データ、変態潜熱）の精度が冷却プロセスの解析精度に直接影響するため、逆解析によって同定される熱伝達率の精度もこれらの材料特性データの精度に左右されることを忘れてはならない。

3・5 熱流体解析による方法

非沸騰性の冷却剤を用いたガス冷やソルト焼入れなど熱伝達特性については、CFD (Computational Fluid Dynamics) の急速な進歩と計算機の計算能力の向上に

よって、熱流体解析による熱伝達率の算出や被冷却物体の冷却プロセスとの連成解析も可能になってきている。しかし、複雑な形状の部品まわりや多数の部品を並べた実炉内での流れの状態は複雑であり、解析精度の検証と向上が望まれる。

油や水、水溶性冷却剤などの沸騰性冷却剤については、その沸騰現象が熱伝達特性を大きく支配するので、熱流体解析によるアプローチが難しい。

4 標準的熱伝達特性データの収集

銅部品の焼入れにおいて、銅部品表面の熱伝達特性は冷却剤の特性と流動状態に加えて、銅部品の形状・寸法・材質・姿勢などに依存するため、各種冷却剤の熱伝達特性データの収集とデータベースの構築は極めて困難である。そのため、一般には円柱などの単純形状試片を焼入れした際の冷却曲線を実測することで冷却剤の冷却能の把握や焼入れ時の表面熱伝達率の同定が行われる。(財)製造科学センター・IMS センター事業の VHT (Virtual heat treatment tool for monitoring and optimising HT process) プロジェクトにおいては、IMS および経済産業省からの助成を受け、2005 年 3 月までの 3 年間、熱処理シミュレーションの実用化に関する共同研究が実施され、その一部として宇都宮大学と出光興産(株)が共同して銀円柱試片を各種の冷却剤に焼入れした際の冷却曲線の実測を行った。また、攪拌槽を用いて焼入れ時の熱伝達特性に及ぼす流速の影響を定量的に把握した。さらに、それらのデータより、集中熱容量法や逆問題的手法により熱伝達率の同定と収集整理を進め、Excel データシートの形でデータベースを作成した。¹⁰⁾図 3 にそのデータシートの一例を示す。

図 3 銀円柱試片 (10mm 径, 30mm 長) の冷却曲線データと熱伝達特性データの一例

5 鋼部品焼入れ時の熱伝達率

5・1 鋼部品焼入れ時の熱伝達率同定法

鋼部品を焼入れしたときの熱伝達特性は、鋼部品の形状・材質・姿勢・表面状態などにも左右される。そのため、焼入れシミュレーションにおいて、銀円柱試片の冷却曲線データより同定した標準的熱伝達率をそのまま実際の鋼部品に適用すると、十分な解析精度が得られないことが多い。そこで、熱伝達率の精度向上のために、シミュレーションの対象となる実部品の冷却曲線を実測し、そのデータより熱伝達率を同定する。この場合には集中熱容量法を適用することはできないので、逆解析的手法を用いる必要がある。一般に用いられる方法は、冷却曲線の計算値を実測値と比較してそれらがほぼ一致するまで熱伝達率を修正して計算を繰り返す反復法である。その処理の流れを図4に示す。ここでは鋼部品表面の熱伝達率の初期値として銀円柱試片の冷却曲線データより同

図4 鋼試片の冷却曲線の実測値より熱伝達率を同定する手順

図5 SCr420 鋼円柱試片（20mm 径、60mm 長）の FE モデル（2次元回転対称）と表面各部の表面熱伝達率（プロットのない実線は銀円柱試片（10mm 径、30mm 長）によって求めた標準熱伝達率）

定した標準的熱伝達率を用いることで逆解析結果の信頼性を高め、収束を早めることができる。また、熱伝達率の修正方法として、各種の最適化手法や最適化プログラムを用いることによって逆解析結果の信頼性を高めることが試みられている。しかし、鋼部品表面を幾つかに分割してそれぞれ異なる熱伝達率を設定して繰り返し修正する場合には、逆解析や熱的・表面境界条件の最適化を行うことが困難な場合が多いので、人の判断によって試行錯誤的に修正を繰り返す方法が用いられる。ここでは筆者らが試行錯誤によって修正して求めた鋼試片焼入れ時の熱伝達率同定結果の代表例を以下に示す。

5・2 鋼試片の油焼入れ時の熱伝達率同定例

鋼円柱と鋼歯車歯切り前リングの有限要素解析モデルと熱伝達率同定結果¹⁰⁾を図5と図6に示す。解析においては2次元軸対称問題とし、表面熱伝達率は図中に示すように幾つかの領域に分けて、それぞれに異なる表面温度依存の熱伝達率を設定し、各表面近傍で測定した冷却曲線の計算値と実測値がほぼ一致するまで熱伝達率を修正して計算を繰り返す試行錯誤による反復法を用いて同定した。鋼円柱および鋼リング表面の熱伝達率は、図中に示した銀円柱試片についての標準熱伝達率と同様の表面温度依存性を示すものの、試片材質や形状の影響によって核沸騰段階の山が高温側にずれることがわかる。さらに、各表面の向きや位置によって熱伝達率に相違が現れている。これらの原因として、下向き面では、蒸気泡の滞留の影響が、測表面においては、表面にそって上昇する蒸気膜の厚さ増加と油温の上昇の影響が推測される。これらの例でわかるように、鋼部品を焼入れしたときの熱伝達特性は、鋼部品の形状・材質・姿勢・表面状態などにも左右される。したがって、銀円柱試片の冷却曲線データより同定した標準的熱伝達率をそのまま実際の鋼部品に適用するよりも、シミュレーションの対象となる

図6 SCr420 鋼歯車の歯切り前リングのFEモデル(2次元回転対称)と表面各部の表面熱伝達率(プロットのない実線は銀円柱試片(10mm 径, 30mm 長)によって求めた標準熱伝達率)

実部品の冷却曲線を実測し、そのデータより熱伝達率を同定することがシミュレーション精度の向上には望ましい。

6 結 び

焼入れシミュレーションに必要な焼入れ時の冷却特性の測定法と表面熱伝達率の同定方法について概説し、そのデータベースの一例について紹介した。現状としては、各冷却剤メーカーが自社の製品について、JIS 銀棒試片の冷却曲線データとそれから求めた特性値(特性温度、 H 値、冷却秒数など)を製品情報の中の冷却能データとして公開しているものか、熱処理関連の論文やハンドブック中に掲載された図表のデータがあるのみであり、種々の焼入冷却剤の冷却能データが整理集約されたデータベースとして公開あるいは販売されているものは見当たらない。その主たる理由は、焼入冷却特性が冷却剤の特性と使用条件に加えて、鋼部品の形状・寸法・材質・姿勢などに依存すること、表面の熱伝達率を求めることが容易ではないことから、各種冷却剤の熱伝達特性データの収集とデータベースの構築は非常に困難なためである。

ここでは、(財)製造科学センター・IMS センター事業のVHT (Virtual heat treatment tool for monitoring and optimising HT process) プロジェクトの一部として作成された、銀円柱試片による冷却特性データベースと鋼試片についての熱伝達率同定の例を紹介したが、2005 年度に設置された日本熱処理技術協会・焼入冷却剤の冷却能データベース研究部会においても、焼入れシミュレーションに用いることを考慮した焼入冷却剤の冷却特性データの収集とデータベースの構築に関する活動を開始しており、今後の成果が期待される。

参 考 文 献

- 1) Materials Process Technology Center (Sokeizai Center) research report 569, "2001 report on heat-treatment CAE", p.4 (2002).
- 2) M. Narazaki, H. Hiratsuka, A. Shirayori and S. Fuchizawa, "Examination of Methods for Obtaining Heat Transfer Coefficients by Quenching Small Probes", Proceeding of the Asian Conference on Heat Treatment of Materials, pp.269-274 (1998).
- 3) M. Narazaki, E. Oki, M. Kogawara, A. Shirayori and S. Fuchizawa, "Effect of Surface Heat Transfer Coefficients on Quench Simulation Accuracy of Steel Parts", Journal of the Visualization Society of Japan, Vol.23, Suppl. No.2, pp.197-200 (2003).
- 4) M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayoria and S. Fuchizawa, "Influence of Wetting Behaviour on Cooling Characteristics during Quenching of Hot Metal", Proceedings of the 3rd International Conference on Quenching and Control of Distortion, Prague, Czech Republic, pp.112-120 (1999).
- 5) M. Narazaki, "Simulation of Distortion during Heat Treating and Coding", Netsu-shori, Vol.42, No.5, pp.333-340 (2002).
- 6) J. P. Holman, "Heat Transfer", p.97 (1976) McGraw-Hill Kogakusha.
- 7) M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori and S. Fuchizawa, "Analysis of Quenching Processes Using Lumped-Heat-Capacity Method", Proceedings of the 6th International Seminar of IFHT, Kyongju, Korea, pp.428-435 (1997).
- 8) S. Kubo, "Gyaku-mondai" (1992) Baihukan.
- 9) E. Wakita, "Gyaku-kaiseki no riron to ouyou" (2000) Gihodou-shuppan.
- 10) Research report on IMS international joint research project IMS0436 "Virtual heat treatment tool for monitoring and optimising HT process", pp.48-60 (2005).