

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Materials

Vol. **15**A1
Feb/2008

マテリアル事業

機械工具
ロボット
機能部品

■ 寄稿・論文・報文・解説

近未来技術展望

「焼入冷却と焼入れシミュレーション」

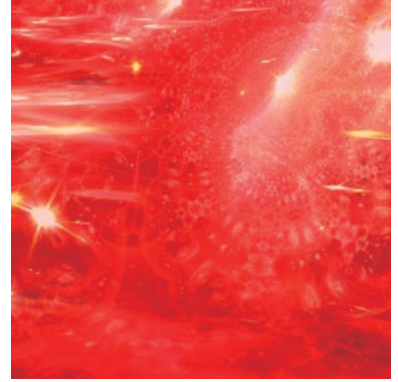
Perspectives on Near-future Technologies
"Quenching and its Simulation"

〈キーワード〉 熱処理シミュレーション・表面熱伝達率・冷却能評価法・
焼入冷却剤・熱伝達率同定・集中熱容量法・熱流体解析

宇都宮大学 工学部

准教授 奈良崎 道治

Associate Prof.Dr.Michiharu Narazaki,
Faculty of Engineering, Utsunomiya University



要 旨

※1
近年、熱処理シミュレーションが熱処理プロセスや部品設計の最適化ツールとして実用化されつつある。しかし、鋼部品の焼入れプロセスのシミュレーションでは熱的境界条件として、鋼部品表面の熱伝達率を与えることが必要である。

※2
本レポートでは、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。

さらに、鋼部品の熱伝達率を同定した代表例や熱伝達率の精度と焼入れシミュレーション精度の関連についての検討結果の例を紹介する。

Abstract

Recently, a simulation in heat treatment is being put to practical use as a tool for optimizing heat treatment and designing of a part. In the simulation of quenching steel parts, the heat transfer coefficient on the part's surface must be provided as a thermal boundary condition.

In this report, the methods of measuring the cooling characteristics for quenching and of identifying heat transfer coefficient are explained and the current status of data base is introduced.

In addition, introduced are the examples of identified heat transfer coefficient for steel parts and the studies of the relations between the accuracy of heat transfer coefficient and quenching simulation accuracy.

1. はじめに

(熟練技術者、技能者の減少)

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なわれ、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⁾。

(熱処理シミュレーション)

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。しかし、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。そのため、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なわれる²⁾。ただし、焼入れシミュレーションの精度を向上させるには、実際の鋼部品を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⁾。

いずれにしろ、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。

(表面熱伝達率のデータベース)

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、焼入れ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れ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。

ここでは、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。さらに、鋼部品の熱伝達率を同定した代表例と熱伝達率の精度と焼入れシミュレーション精度の関連についての検討結果の例を紹介する。

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油、水、各種の水溶液等の沸騰性のもの、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、それにとまって冷却速度は緩→急→緩の順に大きく変化する。

(沸騰性冷却剤による急冷)

沸騰性冷却剤を用いて急冷を行なう際には、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。

(蒸気膜の崩壊挙動)

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 ※4 ※5

1) 焼入冷却剤の冷却能評価法

従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JIS規格やISO規格は定められていなかったが、最近になってJIS法に水溶性焼入れ液の冷却能測定法に関する規格が追加された。

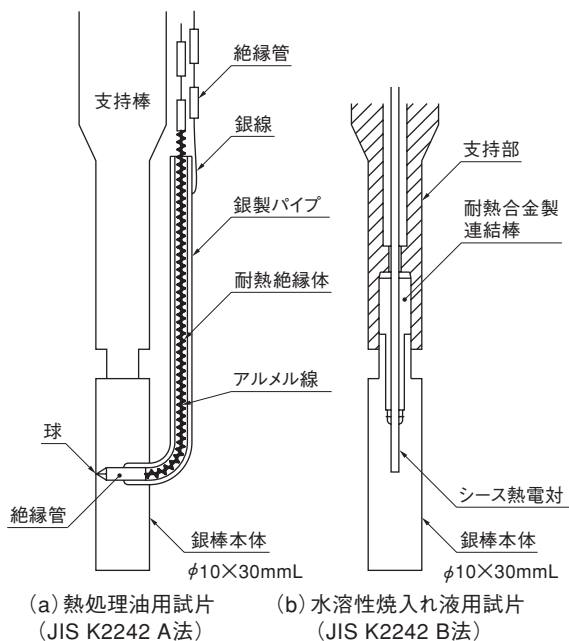


図1 各種冷却剤の熱伝達特性測定用銀円柱試片

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
- ④H値による方法(Grossmann number)
- ⑤熱伝達率曲線、または沸騰特性曲線(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、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⁾。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、精度のよい数値シミュレーションに適用するには不適當である。

(熱伝達率曲線、沸騰特性曲線による方法)

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わすことができ、熱伝達率hは、以下の式で定義される。

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

ここで、Qは部品から焼入れ剤への熱移動量、Aは部品の表面積、 T_p は部品表面温度、 T_l は焼入れ剤の温度である。

鋼部品の焼入れプロセスのシミュレーションを行なうには、⑤の表面熱伝達率を求めることが有効である。以下に焼入れ時の表面熱伝達率を求める方法について紹介する。

2) 代表的な熱伝達率算出法

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いので、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な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)。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よ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。

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およ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、表面熱流束およ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様と仮定して、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およ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および表面熱伝達率を求める方法。

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。

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

あるいは、

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

ここで、 $V[m^3]$ は試片の体積、 $c[J/(kg \cdot K)]$ 、 $\rho[kg/m^3]$ は試片材料の比熱および密度、 $A[m^2]$ は試片の表面積、 $T_p, T_f[K]$ は試片と流体の代表温度、 $h[W/(m^2 \cdot K)]$ は表面熱伝達率、 $q[W/(m^2)]$ 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 $\rho V[kg]$ 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、比熱 c を温度の関数として与えると、

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

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_f 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。

(集中熱容量系として近似的取り扱い)

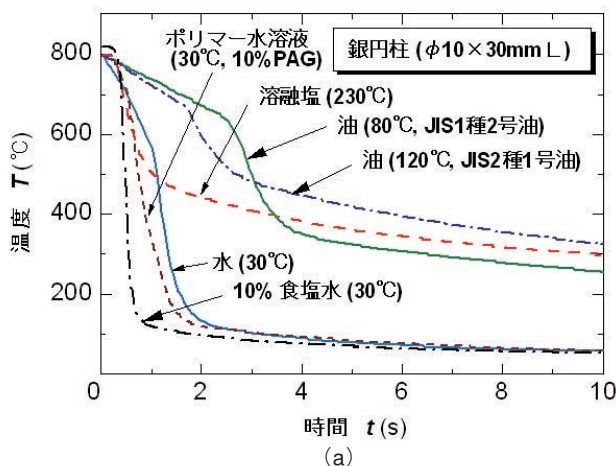
以上より、冷却中の任意の試片温度 T_p に対して、試片の冷却速度 dT_p/dt 値が得られれば、 T_p-h および T_p-q の関係、すなわち熱伝達特性曲線および沸騰特性曲線を得ることができる。

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

$$k = \frac{hV}{\lambda A} < 0.1$$

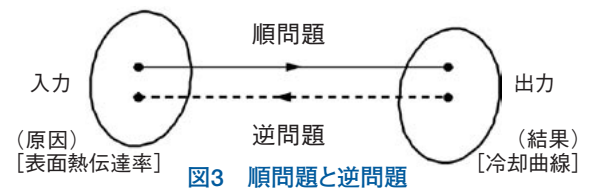
が成り立つ時に有効とされる⁶⁾。JIS試片のような銀円柱試片を熱処理油や水溶性焼入液の冷却能測定に用いる場合は、 k の値が0.1を大きく越えることはほとんどないので、全ての冷却段階において集中熱容量系として近似的に取り扱うことが可能である。さらに相変態や表面酸化の生じない銀を試片の材料として用いることによって、それらの影響を受けない熱伝達特性を測定できるので、最も標準的なデータと考えることができる。

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、図2に示す。



4) 逆解析法

試片寸法が大きい場合や鋼部品のように熱伝導率が比較的小さい場合には、上述の集中熱容量法を適用することができないので、実測した焼入れ冷却曲線データから金属試片や鋼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、冷却曲線[結果]から表面熱伝達率[原因]を求める(図3参照)逆問題の解析には、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)

- 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。
- 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)に必ずノイズや誤差が含まれるが、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。

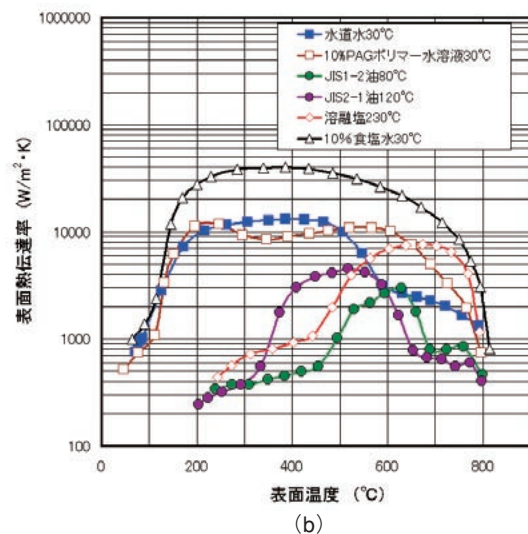


図2 代表的冷却剤中に焼入れした銀円柱試片の冷却曲線(a)とそれらのデータより算出した表面熱伝達特性曲線(b)

このような困難を克服するために、種々の手法(例えば、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よく得るには、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、鋼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。

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焼入れやソルト^{※7}焼入れなどの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。

6) 標準的熱伝達特性データの収集

鋼部品の焼入れにおいて、鋼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、鋼部品の形状・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、(社)日本熱処理技術協会の焼入冷却剤の冷却能データベース研究部会においては、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行ない、Excelデータシート^{※8}の形でデータベースの作成をすすめている。そのデータシートの一例を、図4に示す。

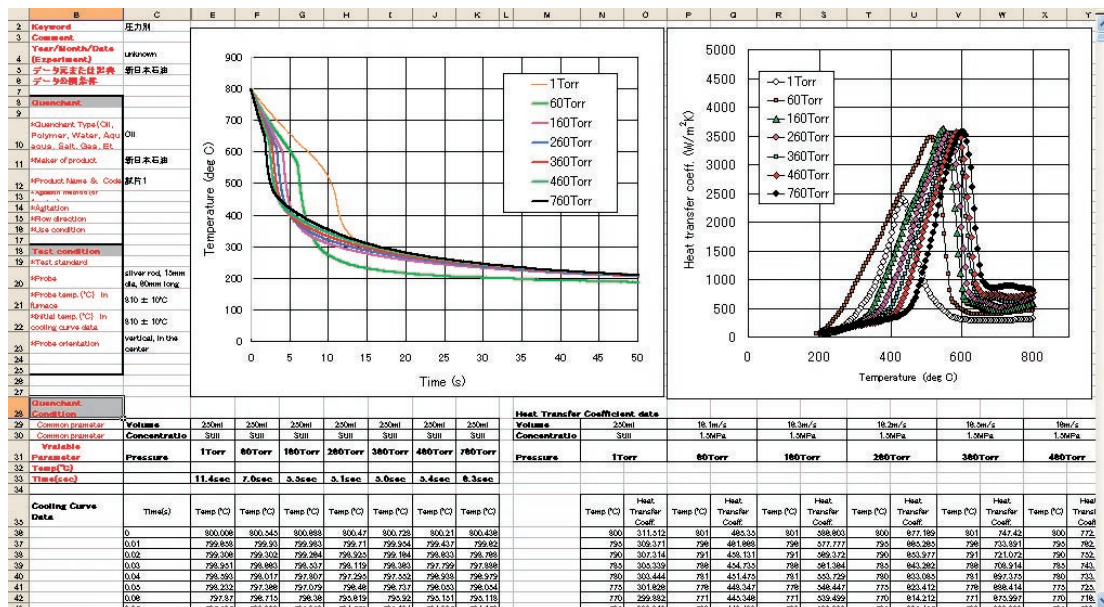


図4 銀円柱試片(10mm径,30mm長)の冷却曲線データと熱伝達特性データの一例

4. 鋼部品焼入れ時の熱伝達率

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。なお、反復法を用いる場合、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な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。

2) 鋼円柱試片焼入れ時の熱伝達率同定精度と焼入れシミュレーション精度

冷却剤として、水とポリマー水溶液を用いた場合のφ20×60(mm)のS45C鋼円柱の焼入れプロセスについて、解析した結果の例¹⁰⁾を以下に示す。シミュレーションは、対称性を考慮して2次元の回転対称問題とし、さらに簡単化のために上下対称として取り扱った。

冷却時の表面境界条件としては、JIS銀プローブとISOインコネル合金プローブの冷却曲線データより、それぞれ集中熱容量法プログラム(LUMPPROB)、および逆解析法プログラム(InvProbe-2D)を用いて算出した熱伝達率を用い、さらに実際のS45C鋼円柱の冷却曲線の実測値に基づいて補正した熱伝達率(図5)を用いた。

焼入れ後のマルテンサイト体積分率分布と変形の計算結果を、図6に示す。表面境界条件として用いた表面熱伝達率の精度に依存して、端面部近傍では特に変形形状に大きな相違が見られる。また、マルテンサイト体積分率分布もそれぞれ相違が認められる。また、焼入れ後の変形量を実測値と比較した結果、熱伝達率を補正してその精度を上げることによって、計算値が実測値に近づき、解析精度が向上することが確かめられている¹⁰⁾。

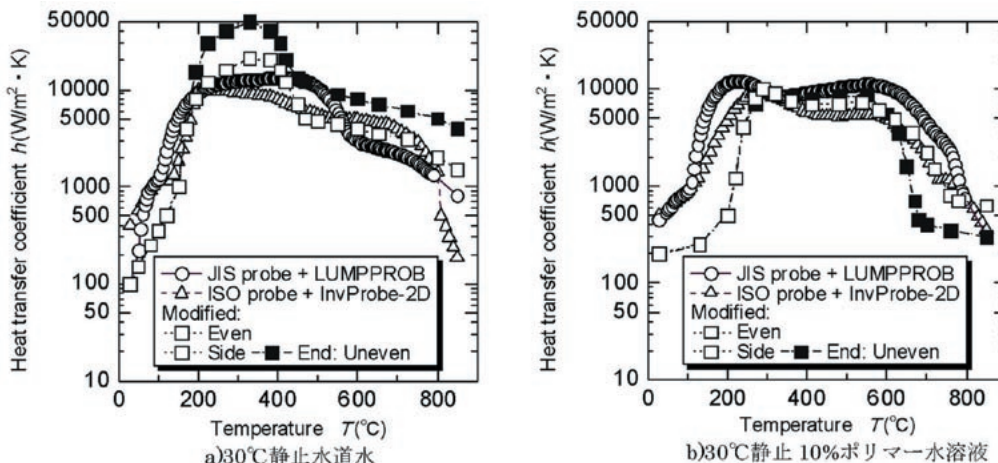


図5 S45C鋼円柱試片(φ20mm×60mm)の焼入れ時熱伝達率の同定結果

方法1: JIS試片と集中熱容量法プログラムLUMPPROB
方法2: ISO試片と逆解析プログラムInvProbe-2D

方法3: 修正(全表面で一様な熱伝達率)
方法4: 修正(側表面と端面とで異なる熱伝達率)

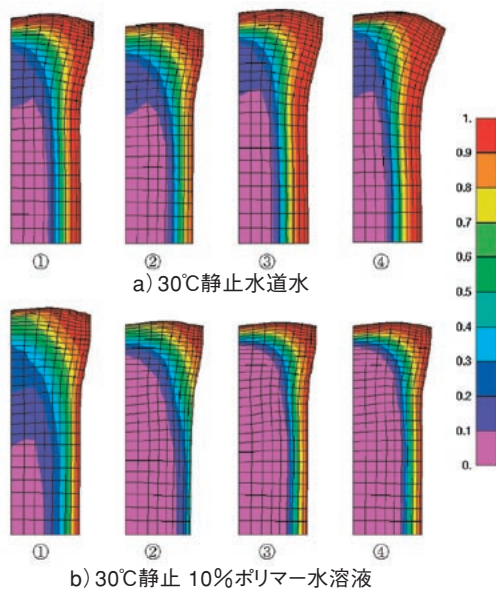


図6 焼入れ後のマルテンサイト体積分率分布と変形(×100)の解析結果:S45C鋼円柱(φ20mm×60mm)

- ① JIS試片と集中熱容量法プログラムLUMPPROB
- ② ISO試片と逆解析プログラムInvProbe-2D
- ③ 修正(全表面で一様な熱伝達率)
- ④ 修正(側表面と端面とで異なる熱伝達率)

3) キー溝付き鋼軸の焼入れシミュレーション

キー溝を軸全長に加工したS45C鋼軸(φ10mm×100mm)の焼入れシミュレーションの結果¹¹⁾を、以下に示す。解析では簡単化のために、左右対称、上下対称として試片の1/4部分に対して6面体要素を用いた有限要素モデル(図7)を作成し、解析ソフトはDEFORM-HTを用いた。図8は、表面熱境界条件として用いた熱伝達率である。熱伝達率の同定は、φ10mm×30mmの銀円柱の冷却曲線データから、集中熱容量法を用いて熱伝達率の近似値を算出し、これを初期表面境界条件として鋼軸の冷却過程の解析を行ない、冷却曲線の計算値が実測値に近づくように熱伝達率を繰り返し修正した。

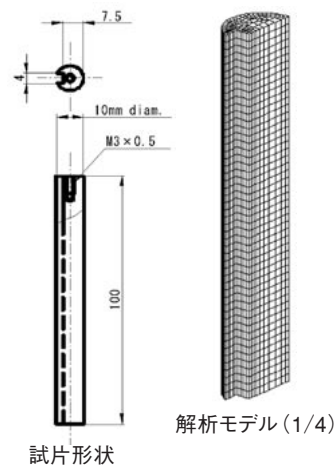


図7 S45C鋼軸試片(φ10×100mm、キー溝深さ2.5mm、幅4mm)と有限要素解析モデル(1/4モデル)

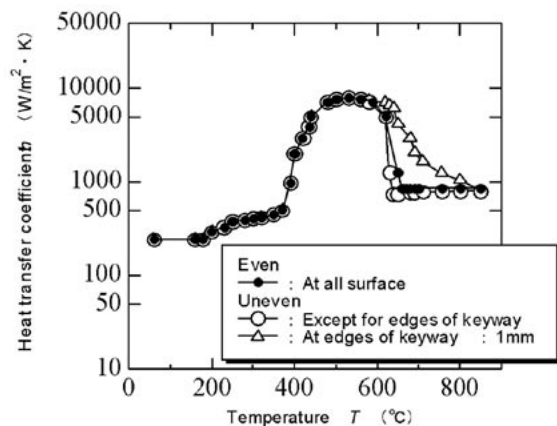


図8 S45C鋼軸試片の油焼入れ時熱伝達率

試片形状:φ10×100mm、キー溝深さ2.5mm、幅4mm
焼入れ油:JIS1種2号油、80°C静止

図9は、試片中央部における曲率の時間的変化の実測値と計算値を示したものである。冷却開始直後は、キー溝側の熱収縮によってキー溝側が凹状に曲がるため、曲率が負の方向へ変化する。ここでは、濡れ挙動を考慮してエッジ部に他の表面よりも大きな熱伝達率を与えると、曲率の計算値が実測値により近くなっている。その後、曲がり戻り、最終的にはキー溝側が凸状(正の曲率)となって曲がり変形がほぼ終了する。最終段階でも、濡れ挙動を考慮した場合のほうが曲率の計算値が実測値により近くなり、解析精度が向上する。これらの結果より、熱伝達率の精度が、焼入変形の解析精度と密接に関連することが確認される。

4) 鋼歯車の焼入れシミュレーション

鋼歯車の有限要素解析モデルと熱伝達率同定結果¹²⁾を、図10と図11に、これらの熱伝達率を歯車表面に与えて計算した冷却曲線と実測した冷却曲線の比較を、図12に示す。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。

鋼歯車表面熱伝達率は、図11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、側表面においては、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。

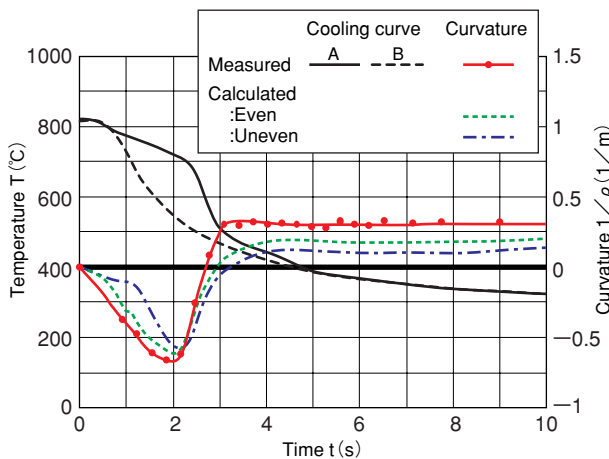
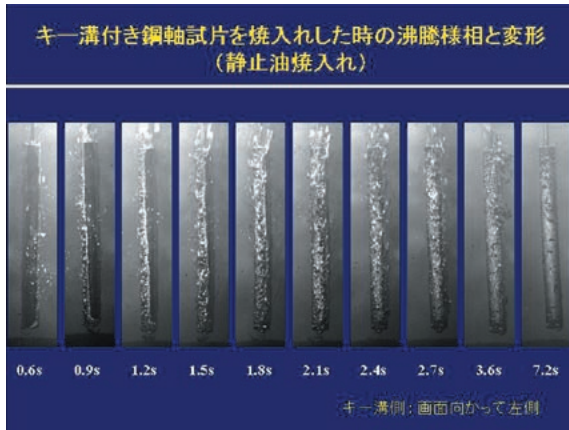


図9 鋼軸の油焼入れ時の変形および鋼軸中央部曲率(1/ρ)の時間的変化の実測値と計算値の比較

ρ : 曲率半径(キー溝側が凸のとき負号は正)
 試片 : S45C鋼軸、10×100mm、キー溝深さ2.5mm、幅4mm
 焼入れ油: JIS1種2号油、80℃静止

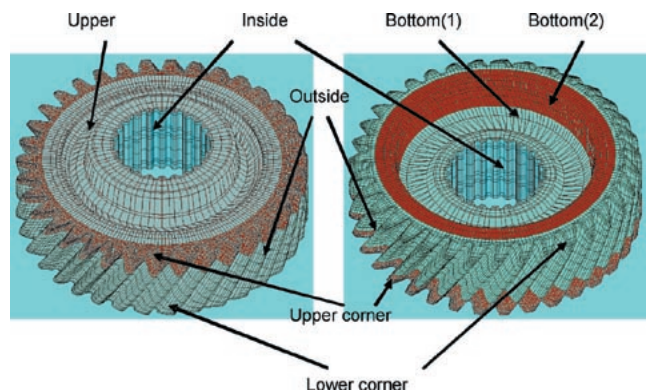


図10 SCr420鋼歯車とFEモデルおよび表面領域の分割

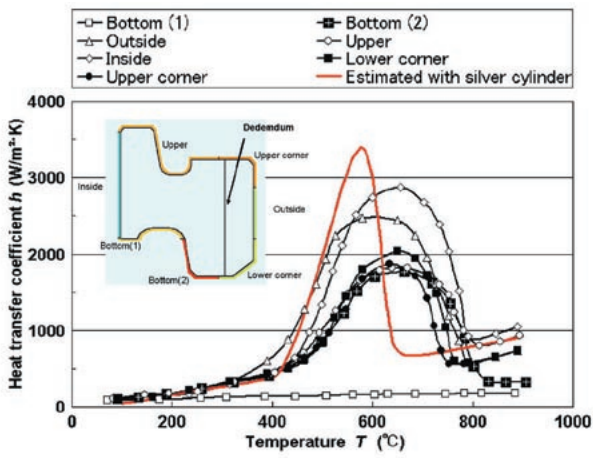


図11 SCr420鋼歯車表面の熱伝達率

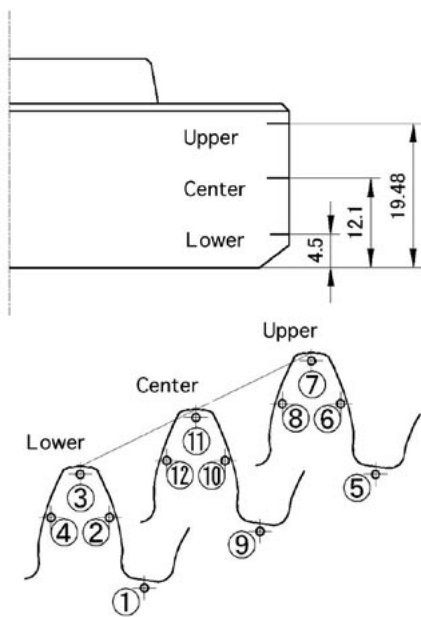
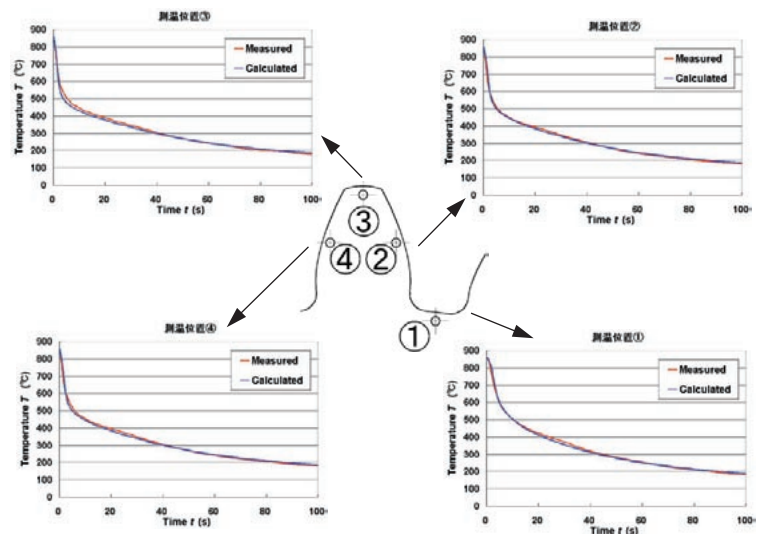
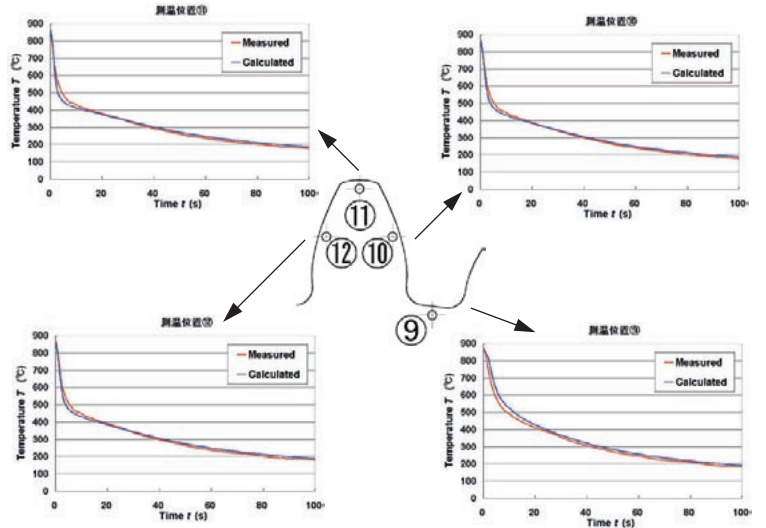
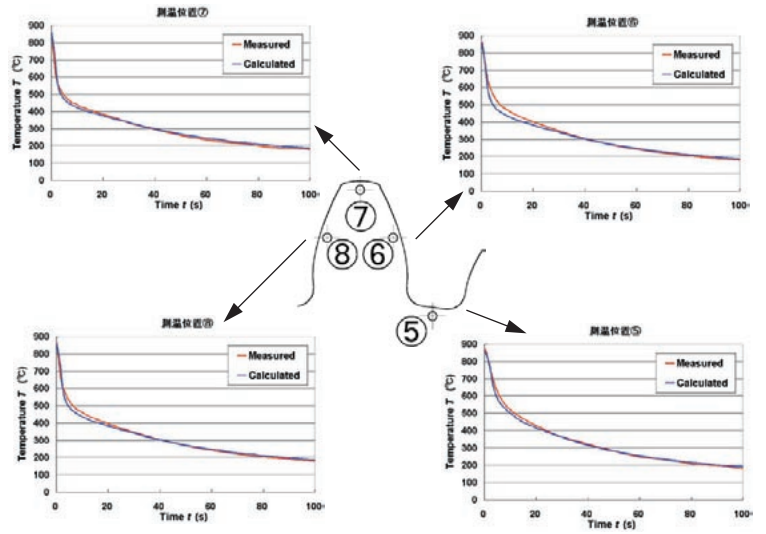


図12 SCr420鋼歯車の油焼入れ時冷却曲線の実測値(赤線)と計算値(黒線)

5. 結び

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し、鋼部品の熱伝達率を同定した代表例や熱伝達率の精度と焼入れシミュレーション精度の関連についての検討結果の例を紹介した。

水、油、ポリマー水溶液などの沸騰性の冷却剤は、沸騰伝熱現象そのものが複雑であるために、その冷却能の定量的把握が難しい。さらに、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・姿勢などにも依存することから、表面の熱伝達率を求めることが容易ではなく、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困難である。

一方、ガスやソルトのような非沸騰性の冷却剤においても、部品周囲の流れが熱伝達に大きな影響を及ぼす点において、やはり定量的把握は容易ではない。

しかしながら、沸騰伝熱や対流伝熱についての基礎的な研究が盛んに行なわれており、また、コンピュータによる逆解析や流れの解析などが可能になっている。したがって、今後のシミュレーション技術の発展とともに、焼入れシミュレーション実施に必要な熱伝達率データの蓄積や熱伝達率算出法の開発が進んでいくものと考えられる。

用語解説

※1 熱処理シミュレーション

伝熱、流体、材料データベースなどを元に、主に熱処理前後の歪量の推定、材料特性の事前検討（強度）、焼入れ組織の推定を数値解析によって行うこと。

※2 表面熱伝達率

部品の表面を境にして固体から液体へ熱が伝わる程度を表す係数。

※3 焼入れ冷却剤

熱処理に於いて加熱昇温、均熱後冷却時に使用する熱媒体のこと。（油、水、ソルト、水溶性薬剤、窒素やアルゴンなどのガスなど）

※4 冷却能評価法

焼入れ剤が持つ冷却能力を評価する方法で、例えば、銀棒試験のように銀棒に熱電対を固定し、垂直方向に落下するように加工したもので、冷却開始から完了まで連続的な温度変化を測定することで冷却剤の冷却能を数値化する方法。

※5 熱伝達率同定

高温固体表面から液体へ熱の伝わる能力を数値化すること。集中熱容量法、逆解析法、熱流体解析などの方法がある。

※6 集中熱容量法

測定対象に於いて、代表点の温度変化を測定することで対象となる系の熱量変化を近似的に表すことができるとみなして熱量変化を測定する方法。

※7 ソルト焼入れ

熱処理（焼入れ）を行なう際に、いわゆる低温ソルト（ NaNO_3 など）を冷却剤として急速冷却する方法、低歪焼入れを狙うような場合に使用する。

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) 奈良崎道治: 熱処理変形シミュレーションと冷却、熱処理 (日本熱処理技術協会誌)、42巻 5号 (2002)、pp.333-340.
- 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) 久保司郎: 逆問題、培風館、(1992)
- 9) 脇田英治: 逆解析の理論と応用、技報堂出版 (2000).
- 10) Narazaki, M., Osawa, K., Shirayori, A. and Fuchizawa, .: Proc. of 19th Heat Treating Conference, Cincinnati, USA .p.600(1999) "Influence of Validity of Heat Transfer Coefficients on Simulation of Quenching Process of Steel", Proceedings of the 19th Heat Treating Conference, Cincinnati, USA (1999), pp.600-607.
- 11) 有本享三, 奈良崎道治: 熱処理シミュレーションによる鋼軸焼曲りメカニズムの解明、熱処理 (日本熱処理技術協会誌)、42巻 5号 (2002)、pp.346-352.
- 12) M.Narazaki, H. Shichino, T. Sugimoto, Y. Watanabe: "Validation of Estimated Heat Transfer Coefficients during Quenching of Steel Gear". Proceedings of the Fifth International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Berlin, German (2007,25-27 April), pp.111-117.