

過去 50 年の熱処理技術の流れ

熱処理シミュレーション(第 1 回)

—その起源と基本モデルの開発—

有本 享三

Heat Treatment Simulation (Part 1)

—Its Origin and Development of the Basic Models—

Kyozo ARIMOTO

Key words: Simulation, Numerical Model, Distortion, Residual Stress

1. はじめに

本協会 25 周年の本誌記念号では、飯田による記事“昔はどうだったか？—熱処理を中心とした歴史”がその巻頭を飾っている⁽¹⁾。飯田は、熱処理の歴史について古代ギリシャ・ローマ、中世、近世の順に述べ、日本に移って日本刀の焼入れに触れた後、“無類の日本の鉄の技術の特質のうえに、徹底した科学的計測法に基づいた金属の本質の究明を志し、熱処理の理論を樹立した科学者が、わが本多光太郎(1870~1953年)であった”という記述でその本文を終えている。

本多の著書“鋼の焼入”⁽²⁾を紐解いてみると、その緒言には、“今回の講習会は鋼の焼入に関する一通りの理論を極く平易にお話しし、併せて実験によって焼入に関する明確なる知識を諸君の脳裡に収めしむるを目的とします”というように確かに“理論”という言葉が出てくる。続いて、“理論家が技術を賤み、技術家が理論を等閑にするのは両方とも悪い習慣でもっとも誠むべきことと考えます”という記述もある。なお、この著作は、1920 年に開催された“鋼の焼入れに関する講習会”⁽³⁾の内容を記録したものである。

さて、本協会の 50 周年に当たり、筆者は熱処理シミュレーションの技術開発の流れについて書くようにとの依頼を受けた。このシミュレーションであるが、“熱処理中に発生する現象（特に変形・応力）を理論的に解明するためのコンピュータ手法”と表現するのが簡便ではないかと常々考えている。本記事を本多の“熱処理の理論”の紹介から始めた理由は、“理論”というキーワードが熱処理シミュレーションに結びつくということにある。そして、さらに意味深いのは、本多がその萌芽期の研究に寄与しているという点にある。

なお、このテーマは本誌に二回に分けて掲載することが許されており、それぞれの副題を“その起源と基本モデルの開発”および“システムの開発と適用”とする。

2. 熱処理シミュレーションの起源と概要

依頼を受けたのは 50 年史ではあるが、熱処理シミュレーションの起源は古く、しかもその萌芽期についての紹介は十分にはなされていない。この機会に起源となる研究の概要について述べ、現状のシミュレーション技術との対比を試みる。

2.1 Maurer と本多—広根の熱処理変形・応力の理論

1940 年の日本金属学会誌には、その前年の 10 月に開催された専門部会の報告が、“鋼(炭素鋼、特殊鋼)の熱処理と歪、焼割れその他”というテーマで特集されている。そして、そこには、本多⁽⁴⁾による報告“鋼の徐冷および急冷に伴う歪について”が含まれている。タイトルの“歪”は“distortion”に対

する訳語であると思われるが、本記事ではこれを“変形”とし、“strain”に対する“ひずみ”と明確に区別する。

上記の本多の報告は、主として 1935 年の本多と広根⁽⁵⁾、そして 1936⁽⁶⁾と 37⁽⁷⁾年の広根が発表した熱処理応力に関する理論的研究に基づいている。これらの論文では Maurer⁽⁸⁾⁽⁹⁾の研究が紹介されていることにより、その影響を受けたことは明らかである。なお、Maurer については本多が欧州視察で Krupp に立ち寄った際に面談したとの記録⁽¹⁰⁾が残されている。また、その略歴が鈴木⁽¹¹⁾によって紹介されている。

Maurer と本多－広根の研究が熱処理シミュレーションの分野に寄与したことは、井上⁽¹²⁾によって指摘されている。しかし、その内容を具体的に述べたものがないということで、50 年史の範囲外ではあるが以下にその概要を記す。

紙面に理論の詳細を述べるだけの余裕がないため、計算事例についてのみ取り上げる。広根の 1937 年の論文では、直径 800 mm の Ni-Cr 鋼の円柱を厚さ 200 mm の鑄型中で冷却する際に生じる各種の現象が計算されている。その原論文の図より、半径（動径）方向の温度分布の時間変化に関するものを図 1 に転載した。図中のギリシャ数字は冷却段階を表わし、I：冷却前の状態(0s), II：804s, III：4869s, IV：6417s, V：8068s, VI：9154s, VII：11700s, そして VIII：16200s である。 θ_m は限界温度で、これより以下では弾性の応力・ひずみ現象が生じるとの仮定がなされている。

この事例では凝固の相変態を考慮せず、500 と 800°C の間における固相変態の効果を図 2 に示す温度－伸びの実測データから得ている。最終的に、応力の 3 方向成分の時間変化が求められているが、図 3 には円周方向成分（接線分歪力）のみの結果を原論文より転載した。本図の I, II, III と IV はそれぞれ図 1 の II, IV, VI と VII に対応しており、VI は完全冷却での状態を示す。なお、この報告では、得られた応力と焼割との関係が考察されている。

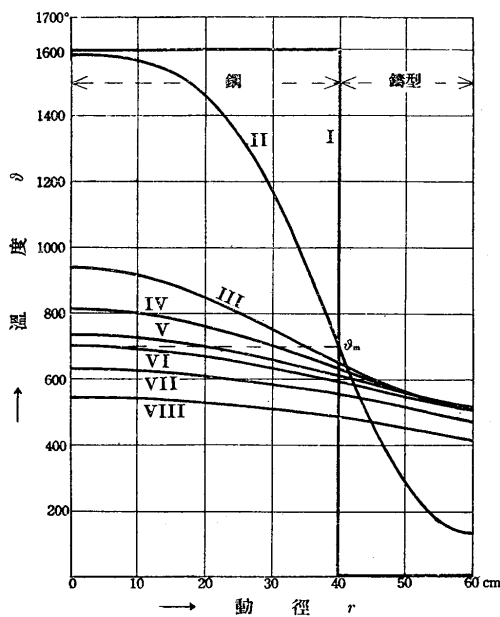


図 1 温度分布の変化(計算)

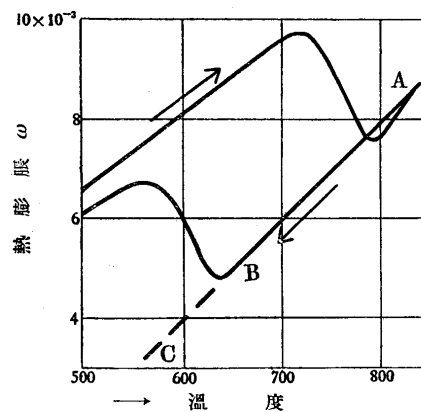


図 2 Ni-Cr 鋼の温度－伸び線図(実測)

本多と広根の研究は、以上のように塑性現象の取扱いを回避し、また、相変態の効果は温度－伸び線図に含めることで簡略化している。一方、この研究の目的は発生応力に基づく焼割現象の解明であり、基本的に今日の熱処理シミュレーションのそれと一致する。したがって、Maurer と本多－広根による研究は、熱処理シミュレーションの起源として位置づけられる。なお、このような解析的研究は、その後、塑性ひずみが考慮できるところまで拡張がはかられている⁽¹²⁾。

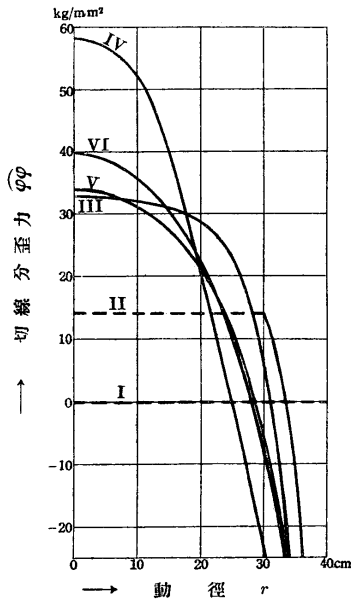


図3 応力の円周方向成分の変化(計算)

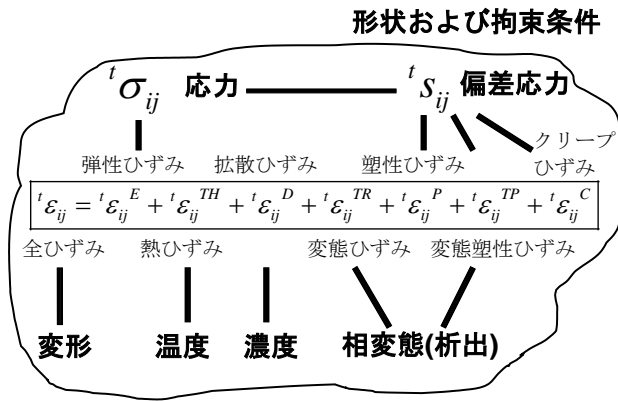


図4 熱処理現象に関連する各種のひずみと応力

2.2 熱処理シミュレーションの概要

ここでは現状の熱処理シミュレーション技術について概説し、Maurer と本多-広根の研究との差を明らかにする。一方、この説明は、次章から述べる熱処理シミュレーション技術の流れを理解する際に役立つものと考えられる。

熱処理中には、その対象物に温度変化、相変態、変形などが生じる。これらの現象は、図4の概念図に示すように対象物の微小部分に生じる各種のひずみと応力に関係しており、これらは任意の時点(時刻 t) では釣り合っている⁽¹³⁾。

熱処理シミュレーションでは、その過程で生じる温度変化、相変態、ひずみ、応力などの時々刻々と変化する現象を追跡する。まず、固体内部の微小部分における全ひずみ ϵ_{ij} であるが、これを対象物にわたって総合したものがその変形として出現する。一方、弾性ひずみ ϵ_{ij}^E は、図4に示すように応力と直に関係しており、応力の状態が降伏条件を越えると塑性ひずみ ϵ_{ij}^P が生じる。熱ひずみ ϵ_{ij}^{TH} と拡散ひずみ ϵ_{ij}^D は、それぞれ温度変化および金属格子間への侵入原子による膨張を表現している。相変態に関係するのは変態ひずみ ϵ_{ij}^{TR} と変態塑性ひずみ ϵ_{ij}^{TP} であり、前者は変態膨張、後者は応力下で変態中にのみ生じる塑性現象に対応する。この他、高温でクリープ現象が生じる場合には、クリープひずみ ϵ_{ij}^C を考慮する必要がある。

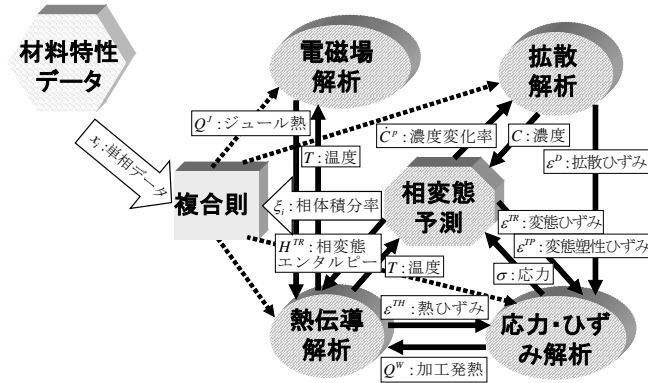


図5 熱処理シミュレーションのシステム

熱処理シミュレーションでは、複雑形状の部品における熱伝導、拡散、電磁場および応力・ひずみの各現象の解析に対し、基本的に有限要素法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を適用する。図5に示すように、個々の解析に対応するモジュールは、互いに温度、濃度、各種のひずみ、応力などの情報を交換することで、熱処理中に時々刻々と変化する現象を追跡する。そこには相変態や析出の進行を予測するモジュールが設けられており、その結果として得られる各相の体積分率は各種の特性データを複合則で求める際に用いられる。

さて、Maurer と本多一広根の理論的研究は弾性、熱、変態の各ひずみと全ひずみを考慮したもので、その対象としたのは解析解が存在する円柱や球であった。しかし、この研究は熱処理における応力と変形のより広範で厳密な理論的解明を目指したはずであり、このコンセプトは熱処理シミュレーションによってほぼ実現したのではないかと筆者は考えている。

3. 熱処理現象に関する基本モデル開発の経緯

熱処理過程では、熱伝導、拡散、応力・ひずみ、電磁場、流れなどの物理現象がその対象物や装置において発生する。さらに対象物では析出や相変態のようなマイクロ組織の変化が生じる。このようなマイクロとマクロの現象は、熱力学によって基礎づけられている。以下で述べるように、熱処理シミュレーションを実現させるには、現象の数学モデルを地道に開発していく必要があった。一方で、シミュレーションの検証は必須であり、そのために必要な変形や残留応力に関する基礎的な測定が実施されたことも見逃してはならない。

3.1 熱処理において生じる物理現象とそのモデル

3.1.1 熱力学

熱力学は、熱機関の改良のために Carnot がそれを理想化したサイクルを構想し、機関の効率を高温と低温の熱源の温度から求めたことにはじまる。その後、熱力学の第一法則と第二法則は Joule, Thomson, Clausius, Gibbs, Maxwell, Boltzmann らによって確立した⁽¹⁶⁾。熱伝導、拡散、化学反応などの非平衡な現象の熱力学に基づく定式は、50年史の以前に確立している⁽¹⁶⁾。

熱力学からは、溶体、混合体、化合物など対し、多成分・多相系での Gibbs 自由エネルギーが得られるが、このような情報は合金の平衡状態図の作成において援用されてきた⁽¹⁷⁾。そして、50年史の間には、計算によって多成分系の平衡状態図を作成するためのソフトの開発とデータベースの整備が、Hillert と Kaufman を中心として進展した⁽¹⁸⁾。その成果として、計算状態図の分野に対する商用ソフトが出現している。

このような熱力学ソフトとデータベースは、単に状態図の作成だけではなく、各種の特性データの予測に対しても用いられている⁽¹⁹⁾。さらには、追って述べるように、拡散解析のソフトとの連成により、相変態や析出を伴う拡散現象の解析にも適用されている。

3.1.2 熱伝導

熱処理の過程では、その対象物における温度分布の変化が重要な意味を持つ。固体における温度変化を求めるための熱伝導方程式は、以下のように古くに確立している⁽²⁰⁾。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

なお、上式は x 軸方向の熱伝導のみを考慮し、 k , ρ および c はそれぞれ熱伝導率、密度および比熱、 \dot{Q} は加工仕事、高周波誘導あるいは相変態による発熱の時間変化率である。

固体の表面における熱伝達現象に対しては次式を適用することができる。

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h(T_e - T_s) \quad (2)$$

ここに、 h は熱伝達係数、一方、 T_e と T_s はそれぞれ環境および固体表面の温度である。

複雑形状の部品における熱伝導現象は、有限要素法を上記の熱伝導方程式と境界条件に適用することで、50年史の初期において解析が可能となった。この手法は、熱処理シミュレーションにおいても用いられている。

一方、熱伝導現象の解析では、種々の材料に対して熱伝導率、比熱、密度などの特性が必要となる。たとえば50年史のすこし前、英国のBISRA(The British Iron and Steel Research Association)は多様な鋼の特性データを系統的に収集して出版⁽²¹⁾した。鋼の合金成分の特性データに対する依存性を簡便に評価する手法は、たとえばMiettinen⁽²²⁾によって報告されている。そして、すでに述べたように、熱伝導特性データの一部は熱力学ソフトからも得られる。

続いて、焼入れ冷却時の表面熱伝達であるが、こちらも50年史以前に多数の研究が発表されている。たとえば、Scott⁽²³⁾は、各種の冷却剤の熱伝達係数を鋼円柱の中心で測定した冷却速度と熱伝導計算の図式解法の結果に基づいて求めている。一方、銀が高い熱伝導性を持つことを利用し、銀球試験片の冷却曲線から熱伝達係数を求める手法がRose⁽²⁴⁾によって発表された。KrainerとSwoboda⁽²⁵⁾は、Roseが作成した5種の焼入れ油と2種の温度の異なる水に対する熱伝達係数の温度曲線を紹介している。図6はその元図の単位を変換して描き直したものである。

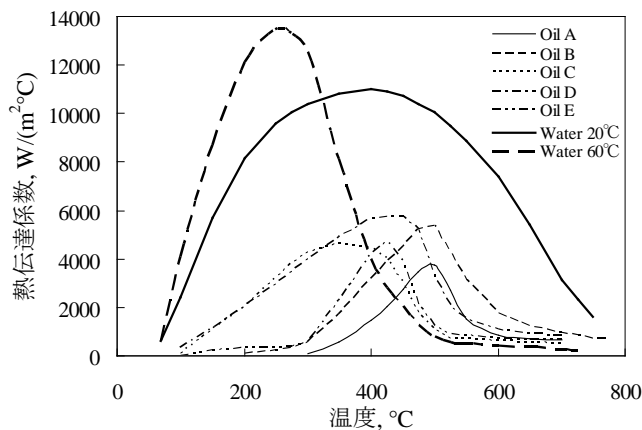


図6 油と水に対する熱伝達係数の温度曲線

銀試験片から得た熱伝達係数はあくまで銀に固有の値であり、また、この係数は各部品の形状や冷却剤の攪拌状態によっても影響を受ける。これらの問題については、現在に至るまで研究が継続している⁽²⁶⁾。

3.1.3 拡散

浸炭、窒化などのプロセスでは熱処理対象物中に炭素や窒素が拡散する。この現象についても熱伝導と同様の方程式が適用できることは古くから知られていた⁽¹⁷⁾⁽²⁷⁾。すなわち、拡散現象の場合、式(1)において T と k をそれぞれ濃度 C と拡散係数 D に置き換え、さらに $\rho c=1$ とする。一方、式(2)でも T を C とし、 h は物質移動係数 β 、そして T_e と T_s はそれぞれ C_e と C_s とする。ここに、 C_s は固体表面の濃度であり、一方の C_e はたとえば浸炭現象ではカーボンポテンシャルと呼ばれる量である。 \dot{Q} は、拡散現象の場合、析出などによるマトリックス中での物質濃度の変化率に対応する。複雑形状の部品における拡散現象の解析は、熱伝導と同様に有限要素法によって可能となった。

拡散現象に関する特性データについても、その蓄積には地道な測定を要した。たとえば、濃度依存性を考慮した拡散係数を得るための実験手法は俣野によって見いだされたが⁽²⁸⁾、Wells ら⁽²⁹⁾はこれをオーステナイト中での炭素の拡散係数に対する系統的な測定に適用した。

カーボンポテンシャルについては、50 年史の以前に定義づけがなされている⁽³⁰⁾。一方、表面からの炭素の移動に関する効果は 1950 年代⁽³¹⁾には知られていたが、具体的にその実験的研究が行われたのは 1960 年代半ばから 1970 年代においてであった。実験には極薄の鉄箔あるいは極細の鉄線が用いられ、これら試料における炭素濃度の時間変化が測定された。たとえば、CO-CO₂ と CH₄-H₂ 混合ガスについては Grabke⁽³²⁾、CO-H₂-H₂O 混合ガスについては Collin ら⁽³³⁾によって物質移動の実験式が報告された。窒化に対する同様の研究は Grabke⁽³⁴⁾によって発表されている。

ガス組成の異なる 11 種の浸炭雰囲気(900°C)に対し、0.05 mm 鉄箔での炭素濃度の時間変化の測定データが Neumann と Wyss⁽³⁵⁾によって報告されている。そのデータからは、図 7 に示すように炭素の物質移動係数(マーカー：◆)を見積もることができる。一方、同図には、Neumann と Wyss によるガス組成の測定値を Collin ら⁽³³⁾の物質移動係数の実験式に適用して得た値(マーカー：■)を示す。ここには、さらに Collin らの実験式で N₂ のガス分率とカーボンポテンシャルを変化させて描いた複数の曲線を描いた。

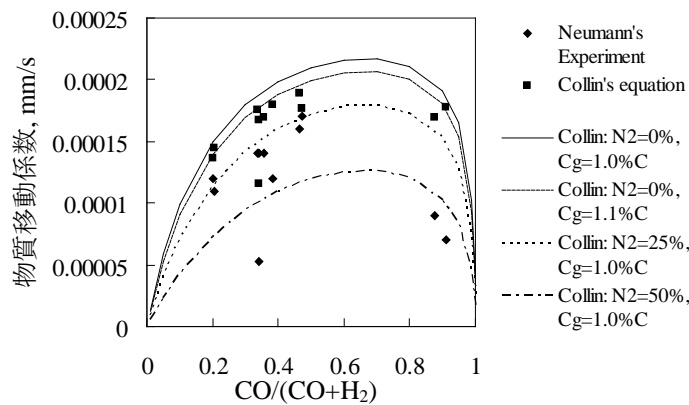


図 7 物質移動係数に対する CO-H₂ ガス分率の依存

3.1.4 応力・ひずみ

熱処理の過程では、すでに前章の図 4 に示したように応力と多種のひずみが生じ、その最終的な結果として熱処理変形と残留応力が発生する。応力とひずみに関連する現象については、その研究史が Timoshenko⁽³⁶⁾によってまとめられている。それによると、弾性だけではなく塑性についても古くから研究が行われていたことが分かる。

塑性の研究は、金属の単結晶を試験片として用いることによって厳密化された。この方面の研究は Elam⁽³⁷⁾、そして Schmid と Boas⁽³⁸⁾によって集約されているが、その成果は転位論の出現へとつながっていく。一方、塑性現象をマクロ的に捉える手法の 1950 年代までの理論的研究は、Hill⁽³⁹⁾によって概説されている。当時においても、たとえば、自緊処理、引抜き、押し出し、圧延などの問題の一部については理論解が得られていたことがわかる。このマクロ的手法は硬さという量を理解するためにも用いられ、研究の成果は Tabor⁽⁴⁰⁾によって集約されている。

今日では、この方面の理論的研究の成果は、有限要素法における熱・弾・塑性・クリープ解析機能⁽¹⁵⁾の形として利用できる。一方で、弾性ひずみを省略した剛塑性モデル⁽⁴¹⁾は、変形の大きな塑性加工のシミュレーションに適用されている。

弾性と塑性だけでなく、熱処理変形には相変態による膨張・収縮が寄与する。結晶の格子定数から各相の密度を求め、これらを用いて相変態による体積膨張・収縮を求める手順は、Lement⁽⁴²⁾の熱処理

変形に関する著作にまとめられている。Lement は、室温におけるマルテンサイトとオーステナイトの格子定数を Roberts⁽⁴³⁾の炭素濃度依存性を考慮した実験式から得た。その後、オーステナイトの格子定数については、Ruhl と Cohen⁽⁴⁴⁾および Dyson と Holmes⁽⁴⁵⁾がより信頼性の高い実験式を報告している。

各相の密度に対する温度依存データからは、熱膨張係数や変態膨張係数を推定することができる。時代が下がると、Fe-C 合金の各相に対する密度の実用式が、温度と炭素濃度の依存性を考慮した形で Jablonka ら⁽⁴⁶⁾によって提案された。さらには、合金成分の効果を考慮したものが Miettinen⁽²²⁾によって発表されている。

Jablonka ら⁽⁴⁶⁾は密度の実用式の妥当性を確認するため、それに基づいて作成した温度-伸び線図を本多⁽⁴⁷⁾および Sherratt と Challoner⁽⁴⁸⁾による熱膨張計の測定値と比較している。筆者も同様の確認を行ったが、図 8 には Fe-0.4% C 合金の場合を示す。ここでは、Roberts⁽⁴³⁾のマルテンサイトとオーステナイト、Dyson と Holmes⁽⁴⁵⁾のオーステナイトの格子定数から求めた伸びをプロットしている。

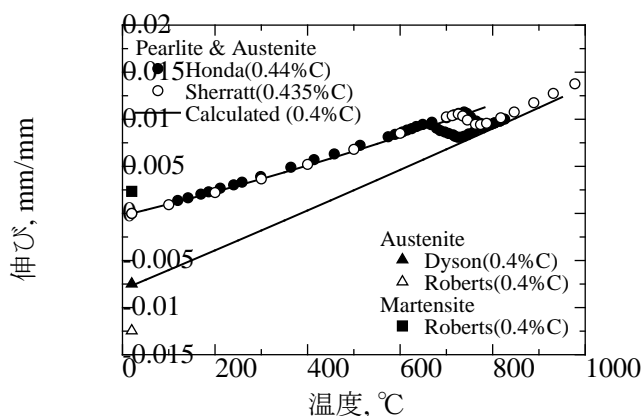


図 8 Fe-0.4% C 合金の温度-伸び線図の比較

熱処理中の部品には種々の原因により応力が発生する。この応力と相変態との相互作用についても研究がなされてきた。応力の存在が変態中に不可逆なひずみを発生させることが Sauveur⁽⁴⁹⁾によって指摘され、Wassermann⁽⁵⁰⁾はこのような現象を変態塑性と名づけた。一方で、菅野と坂本⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾は、種々の焼入れ条件で Fe-Ni 合金円柱に生じた残留応力分布を調べ、その特徴的なパターンの発生には変態塑性が寄与しているとの考察を行った。その他、焼もどし中の変態塑性に関しては、伊藤⁽⁵³⁾による曲げ試験を用いた研究がある。

その後も、変態塑性に関しては多数の基礎的研究がなされたが、拡散型および無拡散型の相変態に対応するものの本質は、それぞれ、Greenwood-Johnson⁽⁵⁴⁾および Magee⁽⁵⁵⁾によって説明されている。なお、変態塑性についての 1980 年代までの研究は Mitter⁽⁵⁶⁾の著作に集約されている。

3.1.5 電磁場

高周波焼入れでは、熱処理対象物の表面付近に電磁誘導による渦電流が生じる。この電流からは材料の電気抵抗の効果で Joule 熱が発生する。渦電流現象の理論解は、平板や円柱のような形状が単純なものに関しては非常に古くから知られており、たとえば中村⁽⁵⁷⁾あるいは Davies と Simpson⁽⁵⁸⁾の著作で解説されている。現在では、複雑な部品形状に対する電磁場解析には有限要素法⁽⁵⁹⁾が用いられ、商用ソフトも現れている。

一方、電磁場解析では温度依存性を考慮した電気抵抗率が必要となるが、たとえばすでに紹介した BISRA のデータブック⁽²¹⁾には複数の鋼種に対するデータが含まれている。なお、透磁率については、Davies と Simpson⁽⁵⁸⁾の著作に実験式が紹介されている。

3.1.6 流れ

熱処理プロセスでは、冷却剤や炉中ガスにおいて流れが発生する。この流れ現象は熱伝達や物質移動に影響を与えるため、熱処理シミュレーションの信頼性の向上という面では、その状態を十分に把握しておく必要がある。

流れに関する研究の歴史は、Rouse と Ince⁽⁶⁰⁾の著作に述べられている。流れの解析に関しても、今日ではシミュレーションが主流となっており、その研究開発の経緯は保原と大宮司⁽⁶¹⁾によって集約されている。この分野においても複数の商用ソフトが現れており、熱処理過程におけるガス冷却剤⁽⁶²⁾および炉中の反応ガス⁽⁶³⁾の流れに対しても適用事例が報告されている。

3.1.7 複合則

熱処理シミュレーションでは、相の混合状態に対する特性値が必要となる。一般に各種の特性は、単独相の特性とその体積分率から単純な複合則に基づいて求められている。

複合則に関する研究は古くから行われており、誘電率、磁化率、電気伝導率および熱伝導率に対する研究については小岩と高田⁽⁶⁴⁾のレビューがある。ヤング率に関しては、Paul⁽⁶⁵⁾および Hashin と Shtrikman⁽⁶⁶⁾により、その上界と下界を求める関係式が提案されている。田村ら⁽⁶⁷⁾は、オーステナイトとフェライト、オーステナイトとマルテンサイトなどの二相混合鋼に対し、その機械的性質に対する実験的研究を行なっている。

3.2 ミクロ組織の変化に対するモデル化

3.2.1 ミクロ組織変化とその分類

熱処理でのミクロ組織の変化には、相変態、析出、回復、再結晶などがある。相変態に関しては解説書が多数あり、たとえば、Christian⁽⁶⁸⁾、藤田一平野と本間⁽⁶⁹⁾、西山^{(70) (71)}によるものなどである。また、50年史以前のこの方面の研究史としては、中澤による啓蒙的な著作⁽⁷²⁾が存在する。

以下の項では、熱処理シミュレーションで用いられている相変態のモデルに関する研究を拡散型と無拡散型に分けて述べる。また、回復と再結晶のモデルについても触れておく。なお、ミクロ組織の進展の厳密なシミュレーションを可能とする Phase-field 法⁽⁷³⁾が発展してきている。この手法は、ミクロ組織の変化に対するモデルの高度化に有効利用されていくものと考えられる。

3.2.2 拡散型変態

パーライト変態のような拡散型変態の挙動は、1930年に発表された Davenport と Bain⁽⁷⁴⁾による TTT 線図の研究により、その本質の把握が可能となった。すなわち、拡散型変態での現象の進行は、試験片をオーステナイト域から目標温度まで急冷した後、等温保持するという条件によって単純化された。

1930年代の末にはかなりの種類の実用鋼に対して TTT 線図が作成され、一方ではその成果に基づいて拡散型変態のカイネティクスに関する研究が試みられるようになった。Johnson と Mehl⁽⁷⁵⁾、Avrami⁽⁷⁶⁾⁻⁽⁷⁸⁾および Kolmogorov⁽⁷⁹⁾は、個別に時間 t における相変態の体積分率 ξ を求めるための以下の定式にたどり着いた。

$$\xi = 1 - \exp(-kt^n) \quad (3)$$

ここに、 k と n は材料に関する固有のパラメータである。なお、上式は JMAK 式と呼ばれることが多い。

その後、Scheil⁽⁸⁰⁾は、相変態の潜伏期における温度変化が階段状に生じると仮定し、個々の区間に対して TTT 線図の変態開始時間から得た潜伏率を加算することで相変態の発生時期を予測した。さらに Tzitzelkov ら⁽⁸¹⁾は、Scheil の方法を拡張し、式(3)の JMAK 式を用いて任意の温度変化での拡散型変態の進展を予測するための手法を発表した。

拡散型変態の応力依存性が **Bhattacharyya** と **Kehl**⁽⁸²⁾によって研究され、等温保持中での応力の存在が変態の開始と終了に影響をおよぼすことを実験的に明らかにされた。

3.2.3 無拡散型変態

無拡散型のマルテンサイト変態も古くから研究されており、変態の結晶学的なメカニズムについての研究成果は 1920 年代に報告されている。一方、 M_s の炭素濃度依存性に関しても実験的に調べられ、さらには、炭素以外の成分の寄与を含む経験式が提案されている⁽⁸³⁾⁽⁸⁴⁾。高合金鋼の M_s の予測については、近年、熱力学に基づく計算によって可能となっている⁽⁸⁵⁾。

マルテンサイト変態のカイネティクスに関する研究は 1940 年ごろより見うけられるようになり、**Koistinen** と **Marburger**⁽⁸⁶⁾は、現在の熱処理シミュレーションで基本的に利用されている以下の形の式を提案した。

$$\xi = 1 - \exp\{-k(M_s - T)\} \quad (4)$$

ここに、 ξ 、 k および T は、それぞれマルテンサイト相の体積分率、材料パラメータおよび変態中での任意の温度である。

式(4)が熱力学および相の核生成・成長理論から導出できることは、**Magee**⁽⁸⁷⁾によって示されている。一方、引張応力、圧縮応力および静水圧の M_s への寄与は、**Patel** と **Cohen**⁽⁸⁸⁾により、実験および熱力学による議論に基づいて明らかにされた。

3.2.4 回復・再結晶

塑性加工後の焼なまし処理では、その条件によって回復あるいは再結晶が生じる。まず回復であるが、この現象によって残留応力が低減する。その際の応力挙動は、リラクゼーション現象との類似性に基づき、クリープ理論と実験的手法によって調べられている^{(89)–(91)}。一方、回復と再結晶の本質については、微視的なモデルによって説明がなされている⁽⁹²⁾⁽⁹³⁾。

塑性加工後の焼なまし中での再結晶は静的再結晶と呼ばれ、その進展については、**Anderson** と **Mehl**⁽⁹⁴⁾によって拡散型変態に対する式(2)と類似のモデルが提案されている。一方、高温での塑性加工中に生じる再結晶は動的再結晶と称され、この現象は結晶粒の制御に用いられている⁽⁹⁵⁾。1990 年初頭までの熱間圧延に関して開発された再結晶モデルは、**Devadas** ら⁽⁹⁶⁾によって集約されている。

3.3 シミュレーション検証のための実験

熱処理シミュレーションの検証には、板、円柱、リングなどの単純形状の試験片における変形と残留応力の測定データとの比較が有効である。残留応力に関してはその分布状態を知る必要があり、円柱の軸方向成分の機械的測定法が **Heyn**⁽⁹⁷⁾によって開発された。その後、**Sachs**⁽⁹⁸⁾は、これを 3 方向成分が測定できる手法に拡張した。

Sachs の方法は、1930 年代に **Bühler** と **Scheil**⁽⁹⁹⁾により、焼入れ鋼円柱試験片の残留応力測定に関する系統的な研究に適用された。国内においても、熱処理残留応力が **Heyn** 法と **Sachs** 法を用いて精力的に測定され、多数のデータが残されている。特に、**磯村**⁽¹⁰⁰⁾による **Sachs** 法を用いた実用鋼円柱に対する系統的な測定は、今後も活用されていくものであると考えられる。

一方、熱処理変形については、種々の熱処理条件での測定結果が、1920 年代の終わりから 1930 年代のはじめにかけて報告された。しかし、系統的な研究は少なく、1940 年に発表された **Ameen**⁽¹⁰¹⁾によるものはいまだに引用されることがある。当然のことながら、熱処理後の変形は測定される機会が多いが、残留応力の特にその分布状態が調べられることは少ない。

さて、熱処理シミュレーションの検証という意味では、一つの試験片において残留応力と変形が測定されていることが望ましい。このような同時測定は、1940 年代の後半に報告された **田中**⁽¹⁰²⁾の鋼円柱の熱処理実験において行われている。図 9 にはその試験片の形状寸法を示す。両端面から内部にいくぶん

入った位置に円周状の V 溝を設け、その間の長さを測定することで端部の複雑な変形の効果を除外している。この溝は、残留応力分布を Heyn 法によって測定する際にも利用された。この試験片については、第 2 章で述べた 1939 年の日本金属学会の専門部会における討論において山田によって紹介されている。

国内では、熱処理の変形と残留応力に関する実験的研究のレビューが、複数の著作^{(103)–(106)}においてなされている。

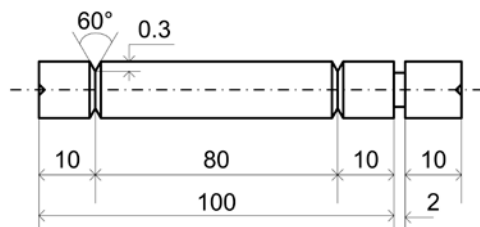


図 9 田中の変形・残留応力の測定用試験片

参考文献

- (1) 飯田賢一：熱処理, 26, p. 27 (1986).
- (2) 本多光太郎：鋼の焼入－文部省主催講習会講義, 大日本図書 (1921) (近代デジタルライブラリー <http://kindai.da.ndl.go.jp/>).
- (3) 石川悌次郎：本多光太郎傳, 日刊工業新聞社 (1964).
- (4) 本多光太郎：日本金属学会誌, 4, p. A79 (1940).
- (5) 本多光太郎, 広根徳太郎：理研彙集, 14, p. 525 (1935).
- (6) 広根徳太郎：理研彙集, 15, p. 243 (1936).
- (7) 広根徳太郎：理研彙集, 16, p. 1229 (1937).
- (8) E. Maurer: Stahl und Eisen, 47, p. 1323 (1927).
- (9) E. Maurer: Stahl und Eisen, 48, p. 225 (1928).
- (10) 本多光太郎：日本鉄鋼協会誌, 11, p.195 (1925).
- (11) 鈴木隆志：ステンレス鋼発明史, アグネ技術センター (2000).
- (12) 井上達雄：熱処理, 42, p. 304 (2002).
- (13) K. Arimoto, T. Horino, F. Ikuta, C. Jin, S. Tamura; M. Narazaki: Journal of ASTM International, 3, Paper ID: JAI14204 (2006).
- (14) J. Fish and T. Belytschko, 山田貴博, 永井学志, 松井和己 訳: 有限要素法, 丸善 (2008).
- (15) K. J. Bathe: Finite Element Procedure, Prentice Hall (1996).
- (16) I. Prigogine and D. Kondepudi, 妹尾 学, 岩元和敏 訳: 現代熱力学－熱機関から散逸構造へ, 朝倉書店 (2001).
- (17) 西澤泰二: ミクロ組織の熱力学, 日本金属学会 (2005).
- (18) 西澤泰二: 金属, 77, p. 63 (2007).
- (19) N. Saunders and A. P. Miodownik: CALPHAD—Calculation of Phase Diagrams – A Comprehensive Guide, Pergamon (1998).
- (20) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Oxford University Press (1946).
- (21) BISRA-The British Iron and Steel Research Association: Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures, Butterworths Scientific Publications (1953).
- (22) J. Miettinen: Met. Mat. Trans. B, 28B, p. 281 (1997).
- (23) H. Scott: Trans. ASM, 22, p. 577 (1934).
- (24) A. Rose: Arch. Eisenhüttenwes., 13, p. 345 (1940).
- (25) H. Krainer and K. Swoboda: Arch. Eisenhüttenwes., 17, p. 163 (1944).
- (26) 奈良崎道治: 熱処理, 50, p. 343 (2010).
- (27) J. Crank: The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press (1956).
- (28) 小岩昌宏：まてりあ, 38, p. 511 (1999).
- (29) C. Wells, W. Batz and R. F. Mehl: Trans. AIME, 188, p. 553 (1950).
- (30) 内田荘祐：ガス熱処理, 日刊工業新聞社 (1961).
- (31) O. Schaaber: 熱処理, 10, p. 303 (1970).
- (32) H. J. Grabke: Arch. Eisenhüttenwes., 46, p. 75 (1975).
- (33) R. Collin, S. Gunnarson and D. Thulin: JISI, 210, p. 777 (1972).

- (34) H. J. Grabke; Ber. Bunsenges. physik. Chem., 72, p. 533 (1968).
- (35) F. Neumann and U. Wyss: Härt. Techn. Mitt., p. 253 (1970).
- (36) S. P. Timoshenko, 最上武雄 監訳, 川口昌宏 訳: 材料力学史, 鹿島出版会 (1974).
- (37) C. F. Elam, 小林篤郎 訳: 金属結晶の変形, 大雅堂 (1943).
- (38) E. Schmid and W. Boas, F.A. Hughes & Co. 訳: Plasticity of Crystals with Special Reference to Metals (1950).
- (39) R. Hill, 鷺津久一郎, 山田嘉昭, 工藤英明 訳: 塑性学, 培風館 (1954).
- (40) D. Tabor, 山本卓 訳: The Hardness of Metals 日本語版, 山本科学工具研究社 (2006).
- (41) S. Kobayashi, S-I. Oh and T. Altan: Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford University Press (1989).
- (42) B. S. Lement: Distortion in Tool Steel, ASM (1956).
- (43) C. S. Roberts: Trans. AIME, Journal of Metals, Feb., p. 203 (1953).
- (44) R. C. Ruhl and M. Cohen: Trans. AIME, 245, p. 241 (1969).
- (45) D. J. Dyson and B. Holmes: J. Iron Steel Inst., 277, p. 469 (1970).
- (46) A. Jablonka, K. Harste and K. Schwerdtfeger: Steel Research, 62, p. 24 (1991).
- (47) K. Honda: Sci. Rep. Tohoku Univ., 6, p. 203 (1917).
- (48) G. G. Sherratt and A. R. Challoner: Special Report No. 24, Alloy Steels Research Committee, Iron & Steel Institute, p. 237 (1939).
- (49) A. Sauveur: Trans. AIME, 70, p. 3 (1924).
- (50) G. Wassermann: Arch. Eisenhüttenwes., 6, p. 347 (1933).
- (51) 菅野 猛, 坂本甲子郎: 鉄と鋼, 36, p. 61 (1950).
- (52) 菅野 猛, 坂本甲子郎: 鉄と鋼, 36, p. 578 (1950).
- (53) 伊藤 篤: 材料試験, 11, p. 146 (1962).
- (54) G. W. Greenwood and R. H. Johnson: Proc. Roy. Soc., 283A, p. 403 (1965).
- (55) C. L. Magee: Transformation Kinetics, Microplasticity and Aging of Martensite in Fe-31 Ni, Ph. D. Thesis, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh (1966).
- (56) W. Mitter: Umwandlungsplastizität und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung von Eigenspannungen, Gebr. Borntraeger, Stuttgart. (1987).
- (57) 中村 仁: 高周波加熱, 厚生閣 (1964).
- (58) J. Davies and P. Simpson: Induction Heating Handbook, McGraw-Hill (1979).
- (59) 高橋則雄: 三次元有限要素法—磁界解析技術の基礎, 電気学会 (2006).
- (60) H. Rouse and S. Ince, 高橋 裕, 鈴木高明: 水理学史, 鹿島出版 (1974).
- (61) 保原 充, 大宮司久明: 数値流体力学, 東京大学出版会 (1992).
- (62) 渡辺陽一: 熱処理, 48, p. 177 (2008).
- (63) 大木 力: 鉄と鋼, 94, p. 42 (2008).
- (64) 小岩昌宏, 高田 潤: 日本金属学会会報, 27, p. 525 (1988).
- (65) B. Paul: Trans. Metall. Soc. AIME, 218, p. 36 (1960).
- (66) Z. Hashin and S. Shtrikman: J. Mech. Phys. Solids, 11, p. 127 (1963).
- (67) 田村今男, 友田 陽, 山岡幸男, 金谷三郎, 小沢正俊, 赤尾 明: 鉄と鋼, 59, p. 454 (1973).
- (68) J. W. Christian: The Theory of Transformations in Metals and Alloys, Pergamon (2002).
- (69) 藤田英一, 平野賢一, 本間敏夫著, 日本金属学会編: 金属物性基礎講座 固体動力学 2, 丸善 (1978).
- (70) 西山善次: マルテンサイト変態, 基本編, 丸善 (1971).
- (71) 西山善次: マルテンサイト変態, 応用編, 丸善 (1974).
- (72) 中澤護人: 鉄のメルヘン, アグネ (1975).
- (73) 小山敏幸: 熱処理, 49, p. 317 (2009).
- (74) E. S. Davenport and E. C. Bain: Trans. AIME, 90, p. 117 (1930).
- (75) W. A. Johnson and R. F. Mehl: Trans. AIME, 135, p. 416 (1939).
- (76) M. Avrami: J. Chem. Phys., 7, p. 1103 (1939).
- (77) M. Avrami: J. Chem. Phys., 8, p. 212 (1940).
- (78) M. Avrami: J. Chem. Phys., 9, p. 177 (1941).
- (79) A. N. Kolmogorov: Izvestia Akademii Nauk SSSR, 1, p. 355 (1937).
- (80) E. Scheil: Arch. Eisenhüttenwes., 12, p. 565 (1935).
- (81) I. Tzitzelkov, H. P. Hougardy and A. Rose: Arch. Eisenhüttenwes., 45, p. 525 (1974).
- (82) S. Bhattacharyya and G. L. Kehl: Trans. ASM, 47, p. 351 (1955).
- (83) R. A. Grange and H. M. Stewart: Trans. AIME, 167, p. 467 (1946).
- (84) K. W. Andrews: JISI, 203, p. 721 (1965).
- (85) G. Ghosh and G. B. Olson: Acta Metall. Mater., 42, p. 3361 (1994).
- (86) D. P. Koistinen and R. E. Marburger: Acta Met., 7, p. 59 (1959).
- (87) C. L. Magee: Phase Transformation, ASM, p. 115 (1970).
- (88) J. R. Patel and M. Cohen: Acta Met., 1, p. 531 (1953).
- (89) 渡辺正紀, 大西 一, 石原芳忠, 佐藤邦彦, 薪先富士雄: 日本機械学会論文集, 19, p. 91 (1953).

- (90) 佐々木良一, 篠田哲守: 材料, 13, p. 169 (1964).
- (91) 田中甚吉, 小幡忠良: 溶接学会誌, 36, p. 222 (1967).
- (92) R. W. Cahn: J. Inst. of Metals, 76, p. 121 (1949).
- (93) R. W. Cahn, 小岩昌宏 訳: 激動の世紀を生きて, アグネ技術センター (2008).
- (94) W. A. Anderson and R. F. Mehl: Trans. AIME, 161, p. 140 (1945).
- (95) 酒井拓, 三浦博己: 塑性と加工, 50, p. 167 (2009).
- (96) C. Devadas, I. V. Samarasekera and E. B. Hawbolt: Metall. Trans. A, 22A, p. 335 (1991).
- (97) E. Heyn: J. Inst. Metal., 12, p.3 (1914).
- (98) G. Sachs: Z. Metallkunde, 19, p. 352 (1927).
- (99) H. Bühler and E. Scheil: Arch. Eisenhüttenwes., 6, p. 283 (1933).
- (100) 磯村良蔵: 鋼の熱処理と残留応力, アグネ技術センター (1996).
- (101) E. Ameen: Trans. ASM, 28, p. 472 (1940).
- (102) 田中実: 東京工業大学学報, 特別号(精密機械研究所報第2号), p. 1 (1949).
- (103) 日本熱処理技術協会: 残留応力, 共立出版 (1963)
- (104) 日本鉄鋼協会: 鋼の熱処理, 丸善 (1969)
- (105) 米谷茂: 残留応力の発生と対策, 養賢堂 (1975).
- (106) 須藤一: 残留応力とゆがみ, 内田老鶴圃 (1988).