

平成 18 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

シミュレーション利用技術による  
熱処理の高度化手法の開発

研究開発成果等報告書

平成 21 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 (株)ひがしん総合研究所

## 目次

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第 1 章 研究開発の概要.....                          | 1  |
| 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標.....                  | 1  |
| 1-2 研究体制.....                               | 3  |
| 1-3 成果の概要.....                              | 4  |
| 1-4 当該プロジェクト連絡窓口.....                       | 6  |
| 第 2 章 シミュレーションの利用に関する基礎的研究.....             | 7  |
| 2-1 はじめに.....                               | 7  |
| 2-2 単純形状および定型形状の部品によるシミュレーションソフトの検証.....    | 7  |
| 2-3 シミュレーションによる予測技術の高精度化.....               | 12 |
| 2-4 シミュレーションのための三次元形状データ生成技術の向上.....        | 12 |
| 2-5 三次元形状測定技術の確立.....                       | 13 |
| 2-6 炭化物や窒化物が析出する場合の拡散シミュレーション技術の開発.....     | 14 |
| 第 3 章 鋼材と冷却剤の高精度特性データベースの構築.....            | 15 |
| 3-1 はじめに.....                               | 15 |
| 3-2 鋼材の材料特性データの収集と高精度化.....                 | 15 |
| 3-3 冷却剤の熱伝達特性データの収集と高精度化.....               | 16 |
| 第 4 章 シミュレーションを利用した問題解決技術の開発.....           | 18 |
| 4-1 はじめに.....                               | 18 |
| 4-2 変形ばらつき低減のための要因分析手法の確立.....              | 18 |
| 4-3 前加工の影響を考慮したシミュレーションの実用化.....            | 19 |
| 4-4 プレス焼入れ・焼もどしにおける低変形の高度化.....             | 19 |
| 4-5 高周波焼入れに対する低変形技術の確立.....                 | 20 |
| 4-6 低変形を実現するための初期部品形状の最適設計技術の確立.....        | 20 |
| 4-7 焼割れの発生要因の解明と防止技術の確立.....                | 21 |
| 第 5 章 熱処理技能のデジタル化による伝承.....                 | 23 |
| 5-1 はじめに.....                               | 23 |
| 5-2 熱処理変形・残留応力の発生のビジュアル化とそのメカニズムの説明.....    | 23 |
| 5-3 熱処理に対する勘と経験のデジタル化とシミュレーションによる解説の共有..... | 27 |
| 第 6 章 全体総括.....                             | 29 |
| 6-1 はじめに.....                               | 29 |
| 6-2 研究開発の成果.....                            | 29 |
| 6-3 本分野での研究の経緯と課題.....                      | 29 |
| 6-4 まとめ.....                                | 30 |
| 参考文献.....                                   | 31 |

## 第1章 研究開発の概要

平成18年度の戦略的基盤技術高度化支援事業である“シミュレーション利用技術による熱処理の高度化手法の開発”は、初年度のみ活動で終了した。以下には、本研究開発の概要について述べる。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

#### 1-1-1 研究開発の背景

熱処理は、部品に温度変化を与えるプロセスであるため、必然的に変形や残留応力に関連する種々の問題を抱えている。熱処理変形に絞っても、たとえば、ドイツでは、毎年、動力伝達用機器の分野だけで、8.5億ユーロ（約1,190億円）の経済損失が生じているとの報告がある<sup>(1)</sup>。この数字は、基本的に歯車関連部品だけの損失であり、その他の部品や研削仕上げ以外の矯正工程、さらには焼割れや過大変形による廃棄処分などを考慮するとさらに増加するものと考えられる。一方、国内ではこのような経済損失に関する統計は公表されていないようである。

自動車および建設・工作機械などの川下製造業では、熱処理に関して以下のような課題を抱えている。

- 軽量化：鉄鋼部品を小型化・軽量化するには、熱処理技術に基づいて以下の項目に示す高強度化を実現することが有効となる。
- 高強度化：鉄鋼部品の高強度化は、熱処理により金属組織、残留応力、硬さなどの分布を最適化することで実現する。
- 静音化：駆動系の静音化には、熱処理部品の低変形化が寄与する。
- 短納期化：納期の短縮には、熱処理プロセスの最適化、熱処理変形の低減、さらには変形矯正工程の短縮または省略が寄与する。
- 低コスト化：コスト低減には、上記の短納期化に加え、焼割れや過大な熱処理変形の防止、熱処理変形に対する矯正および研削仕上げ工程の削減が有効である。

熱処理における問題は、長年に渡って、経験と勘、あるいは試行錯誤的な実験に基づく手間と時間のかかる手法によって解決されてきた。一方、近年、熱処理で生じる各種の現象を数学モデルとして取扱い、これをコンピュータ内で忠実に再現する熱処理シミュレーション技術が開発され、実用化の段階に達しようとしている。この技術は、機械工学、材料工学およびコンピュータ工学を融合したものであり、結果として部品内部における時々刻々の温度、炭素濃度、組織の体積分率、応力、ひずみ、変形などの情報がもたらされる。

国内の一部の川下企業においては、すでに上記の複数の課題を解決するために熱処理シミュレーションが利用されはじめている。このことは、海外での同種の企業においても同様である。今後、このシミュレーションは川上の熱処理加工業でも普及し、その結果として川上と川下の企業間におけるコミュニケーションツールとしての役割を果たすことになるものと考えられる。さらには、このツールの活用により、新たな発想に基づく熱処理プロセスの開発が期待される。ただし、シミュレーションを本格的に利用するためには、まだまだ解決しなければならない問題が山積している。

## 1-1-2 研究目的および目標

### (1) 高度化目標

本研究開発では、自動車および建設・工作機械の部品に対し、シミュレーション利用技術による熱処理の高度化を以下に示す目標に基づいて目指す。

- 熱処理変形の予測と変形抑制技術の向上  
シミュレーション技術を用いて熱処理変形の発生メカニズムを解明し、その成果に基づいて変形抑制技術の高度化を図る。
- 熱処理時間の短縮および省エネルギーに資する技術の開発  
熱処理炉の加熱・浸炭プロセスのシミュレーションにより、プロセスの処理時間や消費エネルギーを予測する。その結果として、熱処理炉の最適運転条件を見い出す。
- ITを活用した生産技術の向上  
ITの一分野であるシミュレーション技術には、ビジュアル化の機能が含まれている。この技術は、技能者が熱処理の現象を直感的に理解し、さらにはその能力を向上させることを支援する。

### (2) 技術的目標

本研究開発では、上記の高度化目標を具体化するために以下に示す技術的目標を定めた。

- シミュレーションの利用に関する基礎的研究
  - ◆ 単純形状および定型形状の部品によるシミュレーションソフトの検証
  - ◆ シミュレーションによる予測技術の高精度化
  - ◆ シミュレーションのための三次元形状データ生成技術の向上
  - ◆ 三次元形状測定技術の確立
  - ◆ 残留応力測定技術の確立
  - ◆ 炭化物や窒化物が析出する場合の拡散シミュレーション技術の開発
- 鋼材と冷却剤に対する高精度の特性データベースの構築
  - ◆ 鋼材の材料特性データの収集と高精度化
  - ◆ 冷却剤の熱伝達特性データの収集と高精度化
  - ◆ 部品形状に対応する熱伝達特性データ修正手法の確立
- シミュレーションを利用した問題解決技術の開発
  - ◆ 変形ばらつき低減のための要因分析手法の確立
  - ◆ 前加工の影響を考慮したシミュレーションの実用化
  - ◆ プレス焼入れ・焼もどしにおける低変形の高度化
  - ◆ 高周波焼入れに対する低変形技術の確立
  - ◆ 低変形を実現するための初期部品形状の最適設計技術の確立
  - ◆ 焼割れの発生要因の解明と防止技術の確立
- シミュレーションによる熱処理炉プロセスの最適化
  - ◆ 加熱プロセスでの炉内温度変化シミュレーション
  - ◆ 浸炭プロセスでの炉内ガス反応シミュレーション
- 熱処理技能のデジタル化による伝承
  - ◆ 熱処理変形・残留応力の発生のビジュアル化とそのメカニズムの説明

## 第1章 研究開発の概要

- ◆ 熱処理に対する勘と経験のデジタル化とシミュレーションによる解説の共有

### 1-2 研究体制

#### 1-2-1 研究組織および管理体制

##### (1) 研究組織

本研究は、図 1.1 に示す組織によって行なわれた。

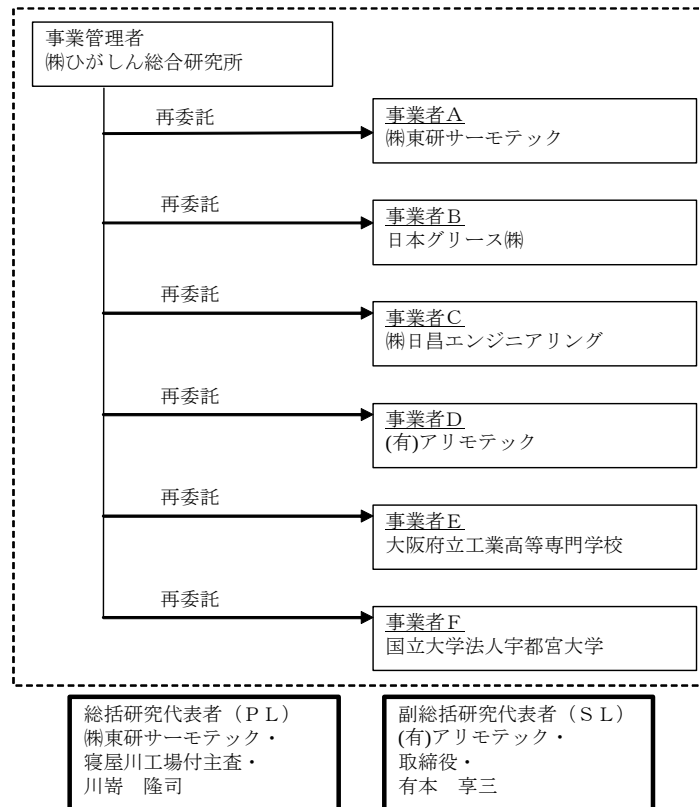


図 1.1 研究組織図

##### (2) 管理体制

本研究は、事業管理者である(株)ひがしん総合研究所の図 1.2 に示す組織によって管理された。

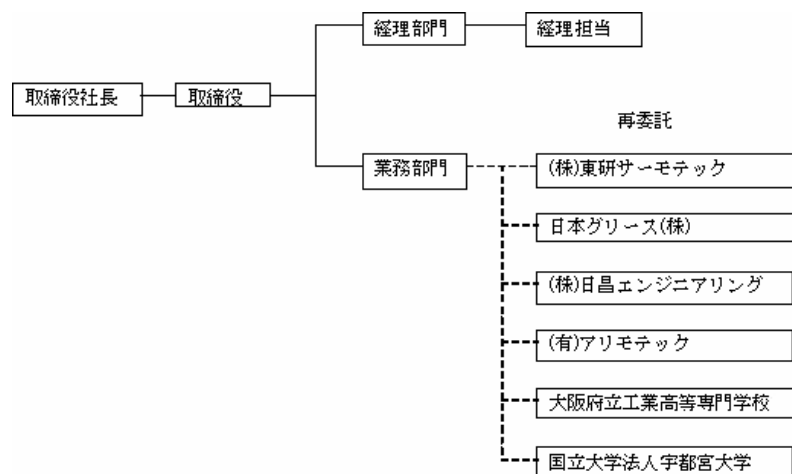


図 1.2 (株)ひがしん総合研究所

### 1-2-2 研究者および協力者

本研究に従事した研究者は、以下の通りである。

- ・(株)東研サーモテック  
川寄隆司： 寝屋川工場・工場付主査，  
別宮逸朗： 寝屋川工場・品証部次長，  
山本喜久治：寝屋川工場・品証部係長，  
森 加樋彦： 寝屋川工場・製造二課課長，  
高橋俊司： 寝屋川工場・設備課課長，  
稲葉良一： 寝屋川工場・製造部部長  
麓 功一： 寝屋川工場・品証部係長  
中尾睦英： 寝屋川工場・製造一課課長  
江夏準一郎： 寝屋川工場・製造三課課長
- ・日本グリース(株)  
朝田 繁： 営業部 常務執行役員営業部長  
富田美浩： 技術研究所 熱処理油グループ・グループリーダー
- ・(株)日昌エンジニアリング  
田中 貢： 代表取締役社長
- ・(有) アリモテック  
有本享三： 取締役
- ・大阪府立工業高等専門学校  
西藪和明： 総合工学システム学科 機械システムコース・助教授
- ・国立大学法人 宇都宮大学  
奈良崎道治：工学部 機械システム工学科 精密システム工学講座・助教授

本研究に対する協力者を以下に示す。

- ・渡辺陽一：日産自動車(株)(現：(独)国立高専機構 宮城工業高等専門学校)
- ・浜坂直治：(株)小松製作所 ・岡村一男：住友金属工業(株) ・市谷克実：出光興産(株)
- ・横田秀雄：新日本石油(株) ・下里吉計：中外炉工業(株) ・生田文昭：高周波熱錬(株)
- ・鮎谷清司：IMST Inst.

### 1-3 成果の概要

平成 18 年度の研究成果について、その概要を実施テーマごとに以下に記す。個々の成果については、各項目に付記した対応する章・節において述べる。なお、本事業は 18 年度のみで終了したため、成果は以下に示すものがすべてである。

#### (1)シミュレーションの利用に関する基礎的研究 [第 2 章]

##### (a) 単純形状および定型形状の部品によるシミュレーションソフトの検証 [節 2-2]

鋼円柱の一端焼入れの実験，キー溝を有する円柱試験片やナイフエッジ形状試験片などの過去の実験に対してシミュレーションを適用し，その精度の確認を行なった。また，平板と円板の片側浸炭焼入れ実験を行ない，浸炭焼入れ機能の検証に有効な種々のデータを得た。さらに，試験片内部の応力測定法について文献調査を行なった。

##### (b) シミュレーションによる予測技術の高精度化 [節 2-3]

ベイナイト変態と変態塑性に関する文献調査を行なった。また，焼もどしに関する若干の調査をつけ加えた。これにより，相変態に関してさらに高精度なモデルを開発することへの可能性を見いだした。

### (c) シミュレーションのための三次元形状データ生成技術の向上 [節2-4]

シミュレーションのための三次元複雑形状部品として平歯車を選び、そのソリッドモデルおよび有限要素モデルを作成した。その際、三次元形状データには、歯車の諸元に基づいて生成したインボリュート曲線を用いた。

### (d) 三次元形状測定技術の確立 [節2-5]

片側浸炭焼入れ実験のために、平板と円板試験片の三次元形状測定を試みた。また、円柱試験片に設けた円周状のV溝の位置座標が、自動求心機能によって認識できることを確認した。

### (e) 炭化物や窒化物が析出する場合の拡散シミュレーション技術の開発 [節2-6]

本シミュレーション技術に関する文献調査を行なった。また、熱力学系ソフトのThermo-CalcとDICTRAを試行し、そのシミュレーション機能の一部について確認した。

## (2) 鋼材と冷却剤の高精度特性データベースの構築 [第3章]

### (a) 鋼材の材料特性データの収集と高精度化 [節3-2]

日本材料学会の“塑性工学部門委員会・材料データベース研究分科会”で作成された“熱処理シミュレーションのための材料データベース MATEQ”を導入し、そこに蓄積されているデータの内容について確認した。また、各特性データに対する熱処理シミュレーションソフトの数値データ形式を調べ、一部の鋼材データについてはこの形式に変換した。さらに、これらの数値データを用いて単純な検証実験に対するシミュレーションを行ない、実際のデータとの比較を行なった。最後に、文献調査により、温度依存性を持つ材料特性データの検証に対する板の片側冷却焼曲り試験の有効性を確認した。

### (b) 冷却剤の熱伝達特性データの収集と高精度化 [節3-3]

主要な冷却剤に対し、冷却曲線と熱伝達係数が対比できるEXCELデータ形式のファイルを作成した。次に、水およびポリマー焼入れ液の攪拌状態で得た銀棒の冷却曲線データより熱伝達係数を同定した。大容量の焼入れ槽を用いることにより、JIS銀棒試験片よりも寸法の大きい試験片に対する冷却曲線データが収集できるようにした。熱伝達係数の新たな同定法の開発についても試みた。さらに、熱伝導逆計算ソフトIHCP1DとPROP1Dの基本機能について確認した。

## (3) シミュレーションを利用した問題解決技術の開発 [第4章]

### (a) 変形ばらつき低減のための要因分析手法の確立 [節4-2]

熱処理変形のばらつきに寄与していると思われる事項をリストアップした。さらに、このような複雑な現象には、シミュレーションによる数値実験手法が有効であることを文献事例によって確認した。

### (b) 前加工の影響を考慮したシミュレーションの実用化 [節4-3]

前加工の中で経験的に熱処理変形への影響が大きいものには、切削・研削加工および冷間加工があることを確認した。これらの加工後には部品に残留応力が生じるが、これを除去するための焼なまし処理の条件についても検討が必要であることを指摘した。

### (c) プレス焼入れ・焼もどしにおける低変形処理の高度化 [節4-4]

プレス焼入れ・焼もどしにおいて過大な変形が生じた事例を調査し、サラバネ状の円板でこのような問題が生じることを確認した。

(d) 高周波焼入れに対する低変形技術の確立 [節 4-5]

高周波焼入れにおける熱処理変形に関する文献を調査し、円柱とリングを用いた試験の事例を見いだした。特に、高周波焼入れ歯車の変形を解明するために行なわれたリング実験は、多様なパラメータスタディがなされているため、再現実験のために適切であるとの結論を得た。

(e) 低変形を実現するための初期部品形状の最適設計技術の確立 [節 4-6]

文献調査により浸炭ハイポイドギヤの製作において、熱処理変形を見込んだ歯切り法に関する研究がなされていることを見いだした。ただし、現時点では、他の部品に関する同種の研究が見当たらない状況である。そこで、文献より引用した浸炭リングおよび平歯車の厳密な焼入れ実験条件に基づく試験方案を作成した。

(f) 焼割れの発生要因の解明と防止技術の確立 [節 4-7]

焼割れに関する文献調査により、焼割れ現象の解明に適した実験を見いだした。すなわち、基本的には、円柱のような単純形状試験片に生じる焼割れが現象解明に適している。段付きの円柱のステージ部に生じる焼割れは、冷却途中で生じる同種の現象の解明に有効である。また、リング付きの円柱の焼入れ、ジョミニー試験片の 2 段焼入れ、さらには偏心穴付き円板の焼入れで生じる割れは再現性が高く、現象解明のために有効な知見が得られる可能性が大きい。

(4) 熱処理技能のデジタル化による伝承 [第 5 章]

(a) 熱処理変形・残留応力の発生のビジュアル化とそのメカニズムの説明 [節 5-2]

熱処理変形や残留応力に関する発生のメカニズムについて解説したプレゼンテーションを作成した。また、熱処理シミュレーションによる解析結果のポスト処理により、熱処理変形・残留応力の発生をビジュアル化した。

(b) 熱処理に対する勘と経験のデジタル化とシミュレーションによる解説の共有 [節 5-3]

数件の熱処理事例に対し、部品の形状寸法図、材質、熱処理条件、熱処理の結果などの情報をデジタル化した。

## 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

本プロジェクトの窓口は、以下に示す事業管理者である。

住所：〒581-0003 大阪府八尾市本町 2 丁目 9 番 1 7 号（大阪東信用金庫内）

名称：株式会社 ひがしん総合研究所

代表者役職・氏名：代表取締役 永信 雅弘

連絡先：Tel: 072-923-2612, Fax: 072-923-2801

連絡担当者所属役職・氏名：取締役 山本俊史

Tel: 072-923-2612, Fax: 072-923-2801

E-mail: souken@ever.ocn.ne.jp

## 第2章 シミュレーションの利用に関する基礎的研究

### 2-1 はじめに

熱処理シミュレーションの商用ソフトは限られた項目に対する検証の後に出荷されており、個別の実際問題に対する一致の程度に関する評価はユーザの判断に委ねられている。そこで、シミュレーションの本格利用に先立ち、その利用のための基礎的研究を行なっておく必要がある。

このような基礎的研究として、まず、熱処理シミュレーションに関する精度の検証と数値モデルの高度化があげられる。シミュレーションを効率的に利用するための研究も不可欠であり、そのためには三次元形状データの作成技術の向上をはかる必要がある。一方、シミュレーションの高精度化には厳密な実験結果との比較が必要で、そのためには熱処理変形および残留応力に関する測定技術の確立が必須となる。さらに、浸炭や窒化現象の解明のためには、炭化物や窒化物の析出を考慮したシミュレーション技術の開発が要求される。

### 2-2 単純形状および定型形状の部品によるシミュレーションソフトの検証

#### 2-2-1 研究目標および成果の概要

円柱、リングなどの単純形状試験片から得られた実験結果とシミュレーションとの比較により、ソフトの精度を厳密に検証する。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

円柱、リングなどの過去の試験データに対して、(有)アリモテック、国立大学法人宇都宮大学と大阪府立工業高等専門学校が、熱処理シミュレーションソフトを用いた解析と比較する。(株)東研サーモテックと(有)アリモテック、大阪府立工業高等専門学校が、片側浸炭の平板と円板に関する焼入れ実験を行い、変形データなどを測定する。

以下に述べるように、鋼円柱の一端焼入れ実験、キー溝を有する円柱試験片やナイフエッジ形状試験片などの過去の実験に対してシミュレーションを適用し、その精度の確認を行なった。また、平板と円板の片側浸炭焼入れ実験を行ない、浸炭焼入れ機能の検証に有効な種々のデータを得た。さらに、今後の研究のため、試験片内部の応力測定法について文献調査を行なった。

#### 2-2-2 単純形状部品による検証

過去に得られた鋼円柱の一端焼入れの実験に対し、熱処理シミュレーションソフト DEFORM-HT (Scientific Forming Technologies Corp.)を用いて解析を行なった。実験と解析結果との比較を行い、材料特性データや水冷面の熱伝達係数データの解析精度に及ぼす影響について検討した。この結果、鋼円柱の代表位置で実測した冷却曲線データより同定した熱伝達係数を熱的表面境界条件として用いれば、焼入れ後の硬さ分布と組織分布、並びに円柱の変形（円柱直径の変化）については、解析結果と実測値がほぼ一致することを確認した。ただし、水冷端近傍の形状や表面の残留応力については、解析と実測値とは異なる結果が得られた。この原因については現在検討中であるが、材料特性および熱伝達係数データの精度不足、さらにはモデル化における不具合などが考えられる。

長尺部品の焼曲り変形は肉眼で判別できるほど大きく、ビデオや連続写真の画像を分析することによってその曲り量を得ることができる。この時々刻々の変形の実測値と解析値とを比較することによって、一般に行われている焼入れ終了後の変形だけに基づくものよりも、さらに高精度な検証が可能となる。そこで、今回は、過去に得られたキー溝を有する円柱試験片やナイフエッ

ジ形状試験片などの非対称断面の試験片における焼曲り変形データとシミュレーション解析値を比較し、シミュレーション精度の検証を行う方法について検討を進めた。

### 2-2-3 板の片側浸炭焼入れ実験

熱処理シミュレーションにおける浸炭焼入れ機能の基礎的検証のために、平板と円板の片側浸炭焼入れ実験を行なった。この実験の条件は、以下に示す文献調査により、過去に行なわれた同種の実験で採用されたものを参考にして設定した。実験の結果より、単に炭素が鋼中に拡散することによって発生する膨張が、最終的な板の曲り変形にどの程度寄与するかを確認することができるものとする。

#### (1) 板の片側浸炭焼入れ試験に関する文献調査

Larson<sup>(2)</sup>および Henriksen ら<sup>(3)</sup>は、4023 鋼および 4620 鋼板試験片の片面浸炭焼入れで生じる焼曲り形状を測定し、さらにこの現象に対してシミュレーションを適用している。板試験片の片面浸炭では、事前に一方の面に対して防炭処理がなされた。板試験片の寸法は、幅 20 mm、長さ 100 mm で、厚さは 1.295, 1854, 2.032, 2.438 および 3.175 mm の 5 種類に設定された。浸炭焼入れ後の曲りは厚さの値の小さい試験片ほど大きく、曲りの状態はいずれの試験片においても浸炭面側から見て凸の状態となった。たとえば、板厚が 3.175 mm の場合、両端部を結ぶ直線を基準とすると板中央での曲り変位量は 1.07 mm であった。これに対して、Larson および Henriksen らによる焼曲りのシミュレーションから得られた値は 1.15 mm であった。しかし、板厚 1.295 mm の場合の曲り変位量は、実験値の 7.42 mm に対して予測値が -1.22 mm となり、まったく異なる結果となった。

その後、Plantil ら<sup>(4)</sup>は、Larson および Henriksen らと同じ浸炭焼曲り実験に対して、変態塑性現象および応力-ひずみ特性におけるひずみ速度依存性を考慮したシミュレーションを適用している。実験とシミュレーションの比較により、焼曲り量だけではなく残留応力に対しても、比較的良好な一致が得られたとの報告がなされている。

一方、Acht ら<sup>(5)</sup>は、20MnCr5 鋼円板(直径 120 mm、厚さ 15 mm)の底面のみを浸炭し、その後に油焼入れを行なった。なお、この実験で得られた浸炭深さは 0.8 mm であった。円板の変形は底面から見て凸形状で、シミュレーションによっても同様の傾向が得られたとの報告がなされている。

#### (2) 片側浸炭焼曲り試験条件の概要

上記の文献調査に基づき、平板と円板に対する片側浸炭焼曲り試験条件を設定した。浸炭焼入れは、板の片側および端面を防炭処理した状態だけではなく、比較のために全面防炭処理のない状態に対しても行なった。冷却条件については油冷と炉冷の 2 種類とした。その他、油冷の普通焼入れ条件についての試験も行なった。

#### (3) 試験片

##### (a) 材質

試験片は、表 2.1 に示すように、各形状の試験片に対し、若干異なる化学組成を持つ SCr420 の棒鋼より作成した。

表 2.1 SCr420 鋼の化学組成(mass %)

| 試験片   | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Cu   |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 平板・円柱 | 0.21 | 0.20 | 0.80 | 0.019 | 0.013 | 0.06 | 1.07 | 0.10 |
| 円板    | 0.21 | 0.20 | 0.78 | 0.018 | 0.015 | 0.08 | 1.07 | 0.12 |

(b)形状・寸法

試験片形状は平板と円板の2種類で、その寸法は以下の通りである。

(i)板面の寸法

・平板：長さ 100mm×幅 20mm                      ・円板：半径 50mm

(ii)板厚

平板と円板のいずれについても、厚さは 1.0, 2.5, 5.0mm の3種とした。試験片は切削加工による荒削りの後に焼きならしを行い、さらに研削加工によって仕上げた。

(c)防炭剤

試験片の片側に、防炭剤：コンドルサル 710（パーカー熱処理工業(株)）を塗布した。一旦乾燥後に、再度同様の防炭処理を行なった。

(d)試験片積載法

試験片の積載状態を図 2.1 に示す。試験片は穴をあけて上から吊している。なお、節 2-5 に述べる三次元形状測定における自動求心の機能を確認するため、円柱で 0.3mm 深さの円周 V 溝を軸方向に間隔を離して設けた試験片を混載した。



図 2.1 試験片の積載状態

(4)熱処理条件

熱処理条件は以下の3種類とした。

・浸炭後油冷                      ・浸炭後炉冷                      ・浸炭なし油冷（普通焼入れ）

各熱処理条件に対するヒートパターンを図 2.2 に示す。浸炭は、結果として表面炭素濃度が 0.8%C で、浸炭深さが 1.0mm 程度となるように種々の条件を設定した。いずれの条件においても、焼入れ後の焼もどし処理は行っていない。なお、焼入油にはハイテンプ A（出光興産）を用いた。

シミュレーション利用技術による  
熱処理の高度化手法の開発

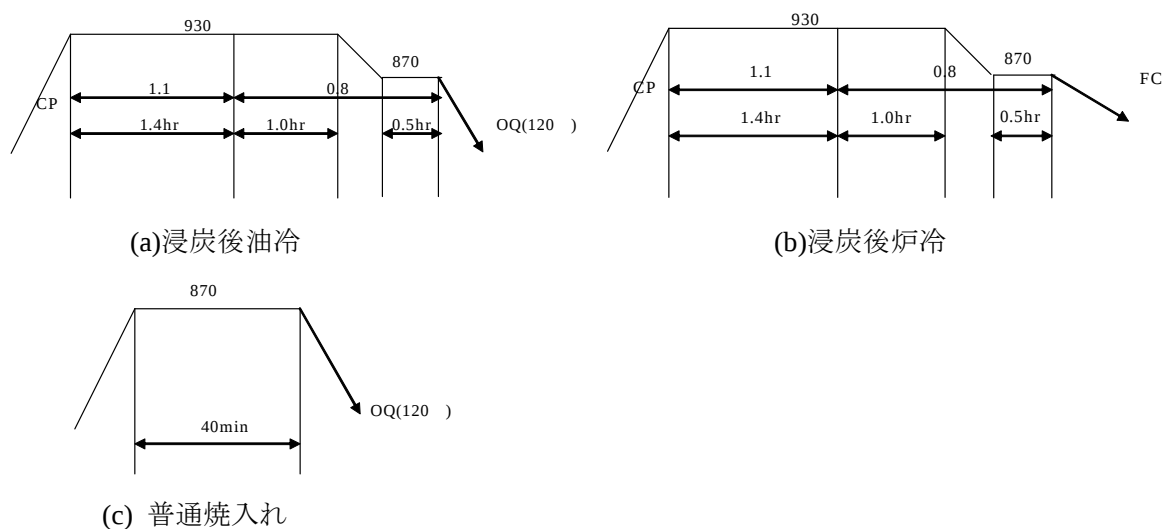


図 2.2 ヒートパターン

(5) 試験結果

(a) 断面の硬さ

図 2.3 には、平板試験片断面における硬さ分布の測定結果を示す。横軸は、表面からの距離である。厚さ 1 mm の平板の結果に関しては、両面防炭なしのケースについても示してある。

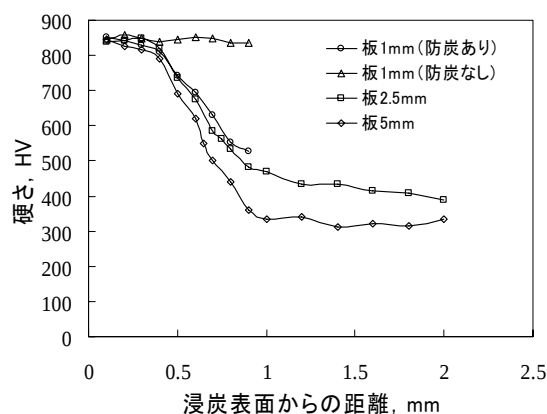
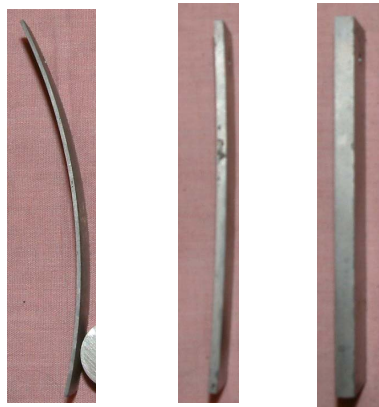


図 2.3 試験片断面の硬さ分布

(b) 変形

図 2.4 には、平板の片側浸炭油冷による焼曲り状態を示す。板厚 1 mm の場合には、顕著な曲りが生じた。曲りは、いずれの試験片においても浸炭面側から見て凸の状態となった。円板における曲り状態として、板厚 1mm の場合についてのみ図 2.5 に示す。円板の表面には防炭剤の痕跡が見られる。

三次元形状測定機ザイザックス SVA fusion（東京精密(株)）を用い、試験片の浸炭面の座標を測定し、熱処理試験の前後での曲り状態を確認した。図 2.6 は、平板と円板における測定点とプローブの移動方向に関する概念図である。



板厚: 1 mm 2.5 mm 5 mm



図 2.4 平板の片側浸炭油冷の焼曲り状態 図 2.5 円板(厚さ 1mm)の片側浸炭油冷の焼曲り状態

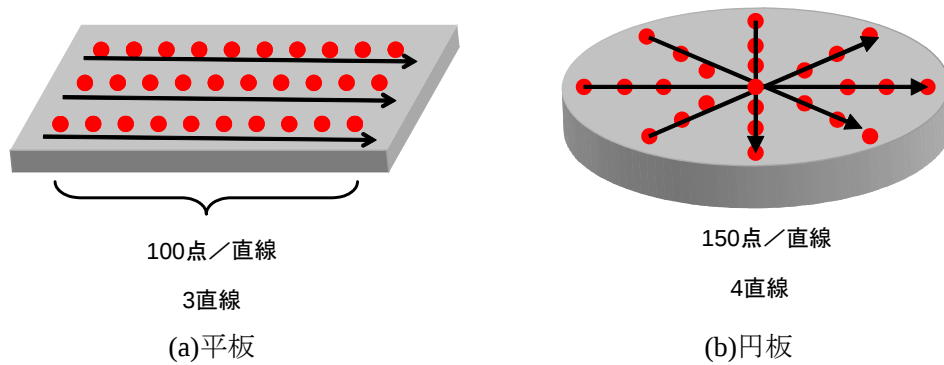


図 2.6 3次元座標測定の実験点とプローブの移動方向

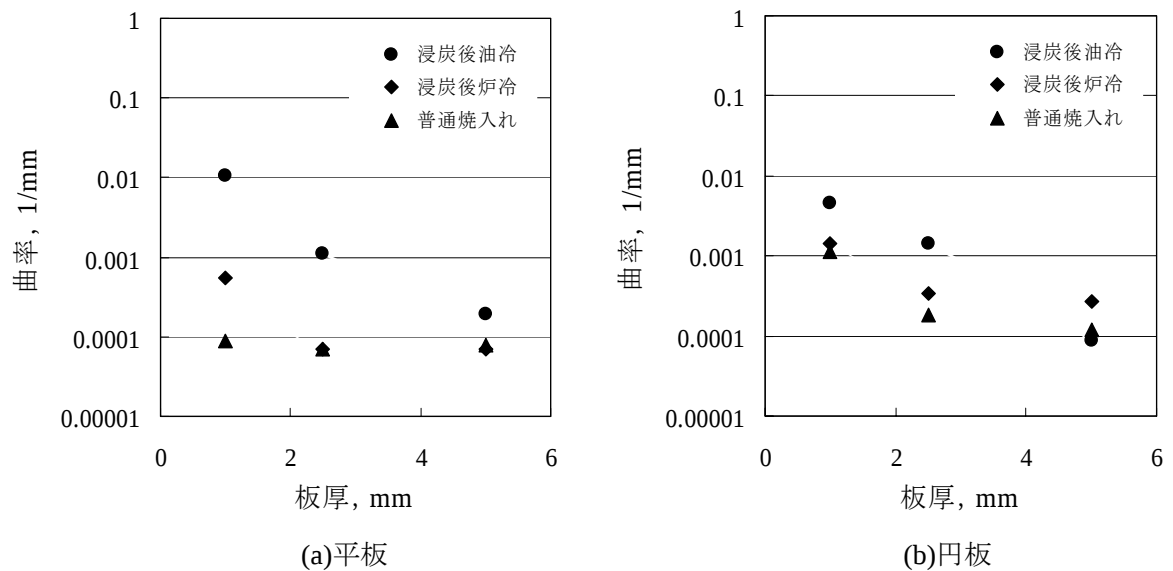


図 2.7 焼曲り曲率の板厚および熱処理条件との関係

平板および円板の三次元測定の結果から得られた長手中央部付近の3点における座標を元にし、これらを通る円弧を描くことによって焼曲りの曲率を求めた。曲率と板厚との関係を図 2.7 に示す。この図では、浸炭後油冷、浸炭後炉冷および普通焼入れの3種の熱処理条件をパラメー

タとしている。

## 2-3 シミュレーションによる予測技術の高精度化

### 2-3-1 研究目標および成果の概要

熱処理シミュレーションの精度向上のためには、そこに使用されている数値モデルおよび特性データをより現実に近いものに改良していく必要がある。個々のシミュレーションソフトにおける数値モデルの改良はその開発者に委ねられるが、ユーザサイドにおいても高精度モデルの開発に対しては何らかの見解を持つておく必要がある。大学や研究機関において新規の高精度モデルが開発され、それが有効であると思われるならば、この成果に基づくシステムの改善を開発者に対して要望していく必要がある。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

(有)アリモテックが、ベイナイト変態、変態塑性などに対するモデルの研究成果について調査する。

本年度は、ベイナイト変態と変態組成に関する文献調査を行なった。また、焼もどしに関する若干の調査をつけ加えた。これにより、相変態に関するさらに高精度なモデルを開発していくことへの可能性を見いだした。

## 2-4 シミュレーションのための三次元形状データ生成技術の向上

### 2-4-1 研究目標および成果の概要

生産現場では、歯車、等速ジョイント、クランクシャフトのような三次元の複雑形状に対するシミュレーションが要求される。そのためには、3D-CAD ソフトの形状データから最適な有限要素法メッシュを作成して境界条件や拘束条件を効率的に設定する技術、そして三次元形状測定装置からの形状データを CAD データと比較して表示する処理技術などの向上を図る必要がある。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

大阪府立工業高等専門学校が、実際の歯車や等速ジョイントを選択し、これらについて形状データと有限要素モデルの作成を試みる。

以下の各項に述べるように、本年度は、シミュレーションのための三次元複雑形状部品として平歯車を選び、そのソリッドモデルおよび有限要素モデルを作成した。その際、三次元形状データには、歯車の諸元に基づいて生成したインボリュート曲線を用いた。

### 2-4-2 歯車の三次元形状データ生成手法の構築

インボリュート歯形データ作成ソフト InvoluteGear 2.0 ((有)ディ・イー・プロダクツ) を用い、歯車形状の理論式に基づく歯車の諸元値およびバックラッシュ等級、許容値、噛合う歯車間の中心距離許容値等を加味したインボリュート曲線を求め、図 2.1 に示す手順で、二次元歯形データを生成させた。この出力データを三次元 CAD ソフト Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 (PTC) にデータマ点として取り込み、これを歯先円直径と同径の円柱ソリッドモデルと一致させることにより、モデルに歯溝を生成させた。歯溝にあたるデータマ点をスプライン曲線で結び、1つの歯溝から歯車のソリッドモデルを生成させた。図 2.1 には、モジュール 3、歯数 50、圧力角 20 度、転位係数ゼロ、バックラッシュ等級 1 級の歯車モデルを示す。

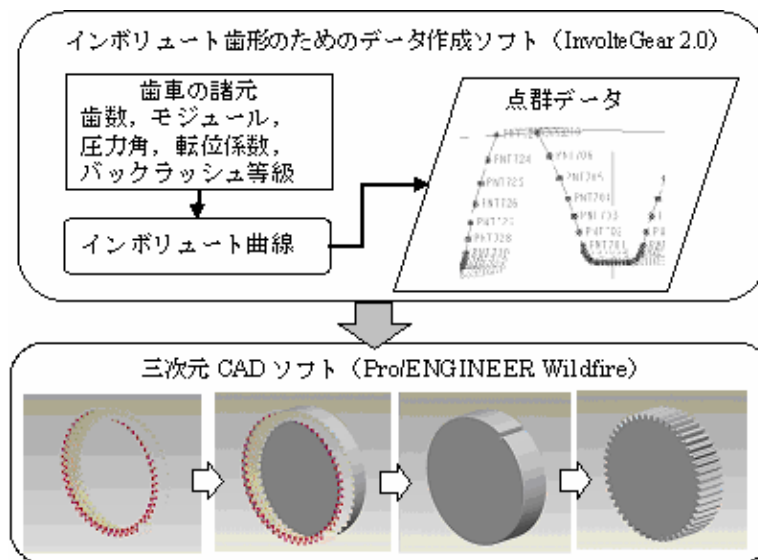


図 2.1 インボリュート歯車のソリッドモデル生成手順

### 2-4-3 歯車の有限要素モデルの作成手法の検討

メッシュ作成ソフト Femap 9.2 (UGS) を用い、前項に示した手法で生成した歯車のソリッドモデルから有限要素モデルの作成を試みた。図 2.2 には、一例として、平歯車の四面体要素モデルの作成結果を示す。

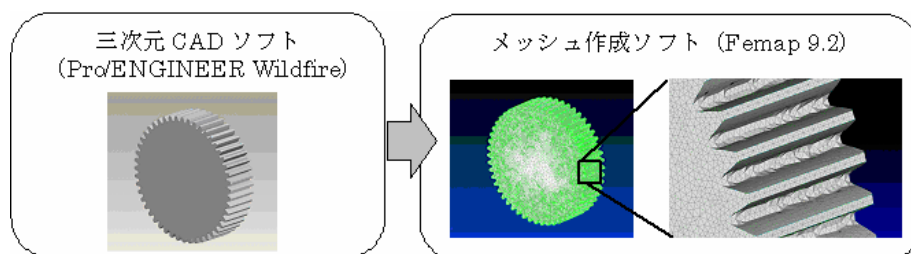


図 2.2 平歯車の有限要素モデルの作成結果の一例

## 2-5 三次元形状測定技術の確立

### 2-5-1 研究目標および成果の概要

三次元形状測定機は、部品の熱処理変形を表面の全体に渡って高精度に把握するのに適している。また、最近では、測定結果のビジュアルな表示により、変形状態を直感的に把握することが可能となっている。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

大阪府立工業高等専門学校が、三次元形状の高精度測定装置を導入し試行する。

以下の各項に述べるように、本年度は、節 2-2 の片側浸炭焼入れ実験のために、平板と円板試験片の三次元形状測定を試みた。また、円柱試験片に設けた円周状の V 溝の位置座標が、自動求心機能によって認識できることを確認した。

### 2-5-2 三次元測定機の導入および平板と円板試験片の三次元測定

三次元形状測定機：ザイザックス SVA Fusion（株東京精密）を用い、熱処理の前後における平

板と円板試験片に対する表面の三次元座標を測定した。その結果については節 2-2 に述べてある。また、三次元データ変換編集用ソフト RapidForm XOR+XOS (INUS Technology, Inc.)を導入し、測定した三次元座標の点群データから、サフェスモデルを介し、三次元形状データが効率よく生成できることを確認した。

### 2-5-3 V 溝付きの円柱試験片の三次元測定

円柱試験片の熱処理変形を評価するため、田中<sup>(6)</sup>は図 2.3 に示す V 溝付き円柱試験片を提案した。この試験では、V 溝間の距離の測定によって熱処理前後における円柱の長さの変化を求めることで、円柱端部の複雑変形の寄与を除外している。

V 溝間の距離の測定が今回導入した三次元形状測定機で可能かどうかを確認するため、節 2-2 の浸炭焼入れ試験において V 溝付きの円柱試験片を追加した。自動求心機能を用いて V 溝の三次元座標の測定を試みた結果、V 溝の位置が正確に測定可能であることを確認した。

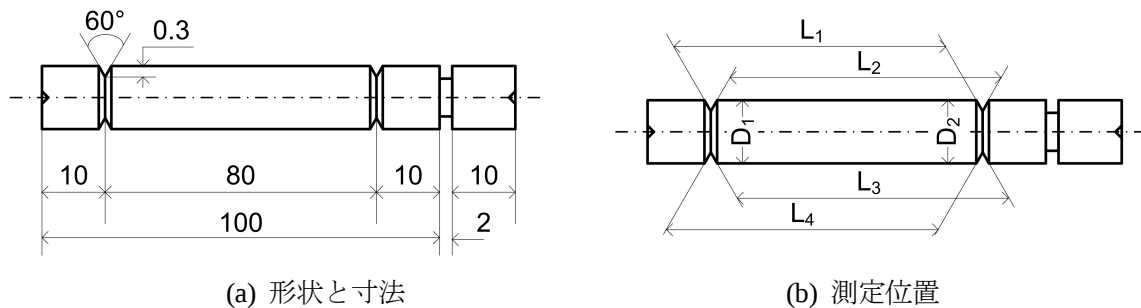


図 2.3 V 溝付き円柱試験片

自動求心の機能は、三次元測定機のセンサーが 3 軸方向の荷重を独立に検知できるという特長を利用している。座標測定のためのプローブ球が V 溝の片側のみに接触した状態では、荷重センサーに面の法線方向だけでなく接線方向の荷重信号が伝わる。スキャンが進行し、プローブ球が V 溝の中心に達すると接線方向の荷重が平衡する。この状態ではプローブ球が V 溝の中心に存在すると認識され、その座標値が確定する。

## 2-6 炭化物や窒化物が析出する場合の拡散シミュレーション技術の開発

### 2-6-1 研究目標および成果の概要

窒化と軟窒化、そして特殊な浸炭条件では鋼に炭化物や窒化物が析出するが、このような現象は一般の熱処理シミュレーションソフトでは考慮されていない。本研究では、析出現象に対して Thermo-Calc と DICTRA<sup>(7)</sup> (Thermo-Calc Software AB)を組み合わせた熱力学系ソフトを適用し、その利用技術に基づいて処理プロセスの高度化を目指すものである。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

炭化物や窒化物の析出のシミュレーションのため、(有)アリモテックと大阪府立工業高等専門学校が熱力学系ソフトを調査する。

18 年度は、本シミュレーション技術に関する文献調査を行なった。また、熱力学系ソフトの Thermo-Calc と DICTRA を試行し、その機能の一部について確認した。

## 第3章 鋼材と冷却剤の高精度特性データベースの構築

### 3-1 はじめに

熱処理シミュレーションでは、鋼材の熱物性、機械的特性などの材料特性データ、そして熱処理対象物と冷却剤との間の熱伝達特性データが必要となる。それぞれの特性データは、日本材料学会の“塑性工学部門委員会・材料データベース研究分科会”および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”において収集がなされている。本研究では、これらの学会で収集されたデータを各ソフトの数値データ形式に変換し、具体的に種々の検証例に適用してその精度を確認する。

### 3-2 鋼材の材料特性データの収集と高精度化

#### 3-2-1 研究目標および成果の概要

本研究では、主要な鋼種に対して過去に収集された材料特性データを、シミュレーションソフトの形式に加工し、さらに基本的な検証手法に基づきデータの精度を確認する。なお、不足するデータについては、新規材料試験あるいは文献調査によって補充する。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

(有)アリモテックと国立大学法人宇都宮大学が、S45C, SCr, SCM および SUJ2 鋼に対し、主要な商用ソフトの形式で完全なひと揃いの特性データを整備する。なお、SCr と SCM 鋼に関しては炭素濃度依存データとする。

以下の各項に述べるように、本年度は、日本材料学会の“塑性工学部門委員会・材料データベース研究分科会”で作成された“熱処理シミュレーションのための材料データベース MATEQ”を導入し、そこに蓄積されているデータの内容について確認した。また、各特性データに対する熱処理シミュレーションソフトの数値データ形式を調べ、一部の鋼材データについてはこの形式に変換した。さらに、これらの数値データを用いて単純な検証実験に対するシミュレーションを行ない、実際のデータと比較した。最後に、文献調査により、温度依存性を持つ材料特性データの検証に対する板の片側冷却焼曲り試験の有効性を確認した。

#### 3-2-2 材料データベース MATEQ の調査

熱処理シミュレーションのための材料データベース MATEQ<sup>(8-10)</sup> (Ver. 1.2) には、各種の鋼材に対し、TTT 線図( $M_s$ を含む)、CCT 線図、熱伝導率、比熱、温度-伸び関係、応力-ひずみ関係、ヤング率およびポアソン比が蓄積されている。ただし、通常の熱処理シミュレーションのためには、温度-伸び関係より熱膨張係数と変態膨張係数、また応力-ひずみ関係より降伏応力と加工硬化係数を読みとって数値データ化する必要がある。一方、変態潜熱については、比熱の温度曲線から推定しなければならない。その他、シミュレーションでは、密度と変態塑性係数が必要となるが、Ver. 1.2 の MATEQ にはこれらのデータは含まれていない。

基本的に、熱処理シミュレーションに必要な材料特性データは温度依存性を持ち、パーライト、オーステナイト、マルテンサイトなどの単独相に対応するものでなければならない。変態潜熱、変態膨張係数などの相変態に関するデータについては、変態の前後の相に応じた固有の値が必要となる。さらに、浸炭焼入れのシミュレーションでは、各材料特性データに対して温度だけではなく炭素濃度の依存性を考慮しなければならない。

MATEQ (Ver. 1.2) の内容について S45C, SCr, SCM および SUJ2 鋼に着目して調査した結果, 各種の特性データ編纂が以下に示す状況にあることを確認した.

- TTT, CCT 線図

S45C, SCr, SCM および SUJ2 のいずれの鋼種についても, TTT, CCT 線図が含まれていることを確認した. なお, S45C, SCr435, SCr440, SCM432, SCM449, SCM445 および SUJ2 については文献<sup>(11)</sup>からの引用である.

- 熱伝導率

S45C, SCr, SCM および SUJ2 の内, SCr に関する熱伝導率のデータは含まれていない. 全体で 100 本近い温度曲線の内の多くは文献<sup>(12)</sup>からの引用である.

- 比熱

S45C, SCr, SCM および SUJ2 の内, SUJ2 に関する比熱のデータは含まれていない. 全体で 60 本程度の温度曲線の内の多くは文献<sup>(13)</sup>からの引用である.

- 温度－伸び関係

S45C, SCr, SCM および SUJ2 の内, SCr と SUJ2 に関する温度－伸び関係のデータは含まれていない. 全体で 70 本程度の関係曲線の内の多くは文献<sup>(14)</sup>からの引用である.

- 応力－ひずみ関係

S45C, SCr, SCM および SUJ2 の内, SUJ2 に関する応力－ひずみ関係のデータは含まれていない. ただし, SUJ1 は存在する. 全体で 90 種程度の関係曲線の組 (複数の温度を束ねた) のほぼ半数は, 高温域での曲線で, 熱間塑性加工のシミュレーションでの使用を目的としたデータのように思われる.

SCr に関しては, SCr420, SCr440, SCr460 および SCr480 のデータが含まれている. また, SCM に関しては, SCM420 と SCM440 のデータが存在する. これらについては, 焼ならし材と焼入れ材の両方から得られたデータで室温から高温域にわたっており, 熱処理シミュレーションために採取されたものである.

- ヤング率

S45C, SCM 鋼のヤング率に関しては文献<sup>(15)</sup>からの引用である. SCr と SUJ2 に対するものは見当たらなかった.

### 3-3 冷却剤の熱伝達特性データの収集と高精度化

#### 3-3-1 研究目標および成果の概要

各種冷却剤に対する熱伝達係数の温度曲線は, 現在, 国内では通常 JIS 銀棒試験から得られる冷却曲線に集中熱容量法を適用して求められている. 厳密には, このデータを実際問題に使用する際に, 銀と鋼材との表面での濡れ性の違いを考慮して補正する必要がある. この補正手法の開発においては, 熱伝導の逆問題手法が有効であると考えられる. 本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである.

国立大学法人宇都宮大学が, 実際に用いられている冷却剤の一部に対し, 各シミュレーションソフトの形式に基づいて熱伝達特性データを整備する. (有)アリモテックと日本グリース(株)と(株)日昌エンジニアリングが, 個々のデータの精度を節 2-2 に述べた検証に基づいて確認する.

以下の各項に述べるように, 本年度は, 主要な冷却剤に対し, 冷却曲線と熱伝達係数が対比で

きる EXCEL データ形式のファイルを作成した。次に、水およびポリマー焼入れ液の攪拌状態で得た銀棒の冷却曲線データより熱伝達係数を同定した。大容量の焼入れ槽を用いることにより、JIS 銀棒試験片よりも寸法の大きい試験片に対する冷却曲線データが収集できるようにした。熱伝達係数の新たな同定法の開発についても試みた。さらに、熱伝導逆計算ソフト IHCP1D と PROP1D の基本機能についても確認した。

## 第4章 シミュレーションを利用した問題解決技術の開発

### 4-1 はじめに

新規の形状または材料の部品の熱処理では、今までとは異なる結果が生じることを念頭に置いておく必要がある。特に熱処理変形のような現象の予測は非常に困難であり、このような問題に対して熱処理シミュレーションが迅速に答えを出せることが期待されている。現状のシミュレーションはすべての条件で高精度であるとはいえないが、このような状況でも有効な使い道を見いだすため、種々の問題に果敢に取り組んでいくべきであると考えます。

### 4-2 変形ばらつき低減のための要因分析手法の確立

#### 4-2-1 研究目標および成果の概要

熱処理変形については、量そのものだけではなく、そのばらつきの低減が求められている。このようなばらつきの問題は、実験による試行錯誤によって解決がなされてきた。本研究では、通常とは逆に、シミュレーションによって熱処理条件を系統的に変化させ、変形のばらつきに大きく寄与する要因を見いだすことを試みる。そして、得られた結果を実験によって確認する。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

(株)東研サーモテックと大阪府立工業高等専門学校が、過去の経験より変形が大きくばらついた3種のケースを選択し、実験の方案を計画する。

以下の各項に述べるように、本年度は、熱処理変形のばらつきに寄与していると思われる事項をリストアップした。さらに、このような複雑な現象には、まず、シミュレーションによる数値実験手法を適用すべきであることを文献事例によって確認した。

#### 4-2-2 熱処理変形のばらつきに関する事例

熱処理変形のばらつきに寄与する事項として、経験的には、たとえば以下に示すものをあげることができる。

- 積載位置

部品は熱処理炉での積載位置によってその熱処理変形の程度が異なることは、常に経験するところである。しかし、このばらつきに対する定量的な報告は少ない。

- 焼入れ温度

焼入れ温度が高いほど熱処理変形の量とそのばらつきが大きくなることが経験的に知られている。しかし、このことを系統的に調べたものはなく、その理由も明確ではない。

- 冷却剤の攪拌

冷却剤の攪拌の程度が、熱処理変形のばらつきに影響を与えることが知られている。

#### 4-2-3 実験の方案

熱処理変形のばらつきを解決するには、種々のパラメータの効果を実験で確認する必要があるが、これは時間と手間のかかる作業となる。一方、現在の熱処理シミュレーションは、数値実験のためのツールとして、そのモデル化と特性データの範囲は限定されるが、すでに用いられている。たとえば、Frerichsら<sup>(16)</sup>は、オーステナイトステンレス鋼の円柱の熱処理変形に対し、いずれの材料特性データが大きく影響するかを数値実験によって調べている。また、同時に、熱処理変

形に対する熱伝達特性の感度についても検討がなされている。複雑な部品に対してはこのような数値実験に関する報告は少ないが、このようなことを系統的に試みる時期に来ているのではないかと考える。

すでに、川下の企業では複雑部品に対するシミュレーション事例が蓄積されてきているので、これらを熱処理変形に対する感度の確認のために利用できるのであれば効率的である。すなわち、熱処理変形のばらつきに大きく影響する因子が数値実験によって特定し、次にそれを実験によって確認する。なお、数値実験だけではなく、シミュレーション結果の分析によって熱処理変形の発生メカニズムが解明できれば、それによって変形に対する個々のパラメータの感度が推定できる可能性がでてくる。

### 4-3 前加工の影響を考慮したシミュレーションの実用化

#### 4-3-1 研究目標および成果の概要

鋳造、鍛造、機械加工などの前加工が、最終の熱処理変形に影響を与えることは経験的に知られている。本研究では、前加工の影響が顕著となる事例を選択して再現実験を行なう。引続き、シミュレーションで影響のメカニズムを明らかにし、これを低減させるための手法を見いだす。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

(株)東研サーモテックと大阪府立工業高等専門学校が、過去の経験より前加工の影響が大きく現われたケースを3種類ほど選択し、再実験の方案を計画する。

以下の項に述べるように、本年度は、前加工の中で経験的に熱処理変形への影響が大きいものとして、切削・研削加工および冷間加工があることを確認した。これらの加工後には部品に残留応力が生じていることを文献によって確認した。

#### 4-3-2 前加工とその影響

前加工の中で経験的に熱処理変形への影響が大きいものとして、切削・研削加工と冷間加工がある。米谷<sup>(17)</sup>、あるいは須藤<sup>(18)</sup>によるレビューから明らかなように、切削・研削加工および冷間加工後の部品には残留応力が発生していることは古くから知られている。たとえば、米谷は、炭素鋼の平削りにおいて、切込み深さ、すくい角、鋼の化学組成の違いの残留応力への寄与に関する研究を紹介している。また、旋削に関する研究に、送り量や切削速度の影響についての記述があることを指摘している。米谷は、切削による残留応力の発生原因として、バイトの接触点における塑性および温度変化をあげている。

冷間での棒材の引抜きや押出し、板材の圧延などで発生する残留応力についても、米谷のレビューによると実験的な研究は古くから行なわれている。たとえば、そこには、引抜きによる残留応力に対し、断面減少率、ダイスの形状、材質による影響を調べた実験的研究が紹介されている。

### 4-4 プレス焼入れ・焼もどしにおける低変形の高度化

#### 4-4-1 研究目標および成果の概要

プレス焼入れ・焼もどしは、低変形を実現するための信頼性の高いプロセスとして利用されている。しかし、最適な熱処理条件は、通常、実験により多数の試行錯誤を繰り返すことによって見いだされている。本研究ではこのプロセスにシミュレーションを適用し、効率的に最適条件を設定する手法を開発するための方向性を探る。なお、この熱処理プロセスは接触問題を含む複雑

な現象であるので、現時点ではシミュレーションを適用した事例は見うけられない。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

(株)東研サーモテックと大阪府立工業高等専門学校が、過去の経験よりプレス焼入れ・焼もどしにおいて過大な変形が生じた 3 種のケースを選択し、再実験の方案を計画する。

以下の各項に述べるように、本年度は、プレス焼入れ・焼もどしにおいて過大な変形が生じた事例を調査し、サラバネ状の円板でのこのような問題が生じることを確認した。

#### 4-4-2 プレス焼入れ・焼もどしにおいて過大な変形が生じた事例

サラバネ状の円板を新規の条件で試験的にプレス焼入れ・焼もどしすると、その熱処理変形が許容値を超えることがある。すなわち、プレス焼入れ・焼もどしによる熱処理変形については定量的に把握がなされていない。このような問題は、試行錯誤でプレス治具や熱処理条件の手直しを行なうなど、時間と労力をかけて解決されている。

#### 4-4-3 実験の方案

プレス焼入れ・焼もどしにシミュレーションを適用した事例は見当たらない。その理由として、プレス焼入れ・焼もどしでは、熱処理対象物と金型との接触現象を考慮する必要があるためと考えられる。

当面は、現象を簡略化したモデルを用いてシミュレーションソフトの機能を確認し、数値実験やメカニズムの解明などを試行すべきである。その後、この成果を踏まえてシンプルな条件設定の実験を計画し、その結果とシミュレーションとの比較によって精度の向上を図っていくという手順が現実的である。

### 4-5 高周波焼入れに対する低変形技術の確立

#### 4-5-1 研究目標および成果の概要

高周波焼入れは、一品処理であるので熱処理変形のばらつきが少ない。しかし、この手法に特有の熱処理変形が生じるので、その低減が必要となる。最終的に、本研究では実際の部品で変形の絶対量が問題になったケースに対して系統的なシミュレーションを行い、その結果として低変形のために大きく寄与する要因を見いだす。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

(有)アリモテック、国立大学法人宇都宮大学と大阪府立工業高等専門学校が、過去の経験より高周波焼入れの際に過大な歪みが生じた 3 種のケースを選択し、再実験の方案を計画する。

本年度は、高周波焼入れにおける熱処理変形に関する文献を調査し、円柱とリングを用いた試験の事例を見いだした。特に、高周波焼入れ歯車の変形を解明するために行なわれたリング実験は、多様なパラメータスタディがなされているため、再現実験のために適切である。

### 4-6 低変形を実現するための初期部品形状の最適設計技術の確立

#### 4-6-1 研究目標および成果の概要

低変形を実現するために、熱処理前の部品形状をシミュレーション結果に基づいて最適化しておくというアイデアがある。本研究では、この考え方を実際の部品で具体的に確認し、初期部品

形状の最適設計技術の確立を目指す。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

(有)アリモテック、国立大学法人宇都宮大学と大阪府立工業高等専門学校が、典型的な部品形状を3種類ほど選択し、試験方案を計画する。

本年度は、文献調査により浸炭ハイポイドギヤの製作において、熱処理変形を見込んだ歯切り法に関する研究<sup>(19)</sup>がなされていることを見いだした。しかし、現時点では、他の部品に関する同種の研究が見当たらない状況である。そこで、今回は、試験方案として、文献より引用した浸炭リングおよび平歯車の焼入れ実験条件についてのみ検討した。

### 4-7 焼割れの発生要因の解明と防止技術の確立

#### 4-7-1 研究目標および成果の概要

熱処理中における焼割れは、現在においてもその発生を完全に防止できるまでには至っていない。本研究では、典型的な焼割れ発生事象をシミュレーションによって解明し、さらには、その結果に基づき割れ発生を防止するための評価手法の確立を目指す。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

(有)アリモテック、国立大学法人宇都宮大学と大阪府立工業高等専門学校が、過去の文献に基づき、単純形状の試験片を用いた焼割れ実験の方案を作成する。

以下の項に述べるように、本年度は、焼割れに関する文献調査により、焼割れ現象の解明に適した実験を見いだした。基本的には、円柱のような単純形状試験片に生じる焼割れが現象解明に適している。段付きの円柱のステージ部に生じる焼割れは、冷却途中で生じる同種の現象の解明に有効である。また、リング付きの円柱の焼入れ、ジョミニー試験片の2段焼入れ、さらには偏心穴付き円板の焼入れで生じる割れは再現性が高く、現象解明のために有効な知見が得られる可能性が大きい。

#### 4-7-2 実験の方案

焼割れ現象の本質を把握するには、最適な実験を見だし、シミュレーションと厳密に比較する必要がある。すでに述べたように、過去に焼き割れの原因を調べる目的で、種々の実験が行なわれている。しかし、当時の報告には、時々刻々の温度の測定データや焼割れ発生時刻などが含まれていないものが多い。したがって、焼割れシミュレーションの検証のために再度同様の試験を行なう際には、このようなデータを詳細に測定する必要がある。以下に示すものが、再試験の候補となるものと考えられる。

- 円柱の縦割れ試験

過去に行われた多数の円柱試験では、割れの発生条件が明確になっている。たとえば、磯村と佐藤<sup>(20)</sup>、BühlerとHerrmann<sup>(21)</sup>、三木田ら<sup>(22)</sup>による試験である。

- 段付き円柱の円周割れ試験

段付き円柱試験片では、冷却の途中で段部に焼き割れが発生した事例がある<sup>(23)</sup>。しかも、それは段部のフラット面で円周状に発生したということで、シミュレーションとの比較に適している。

- 薄肉リング付き円柱の円周割れ試験

薄肉リング付き円柱の焼入れでは、リングの付け根において円周方向の割れが報告されている<sup>(24)</sup>。軸受鋼に対してすでに種々の冷却条件で実験が行なわれており、割れの発生パターンが

明らかにされている。

- 一端冷却試験片の横割れ

一端冷却中の円柱試験片を食塩水に浸漬すると、オーステナイトとマルテンサイトの境界面で割れを生じる<sup>(25)</sup>。この試験は、再現性が良好であるとの報告がなされている。

- 偏心穴付き円板試験片の割れ

偏心穴付き円板試験片<sup>(26)</sup>での焼割れは、冷却途中で生じる割れの典型的な事例で、現実の部品で生じる現象に近いものと考えられる。ただし、3次元モデルによるシミュレーションが必要であるので、評価には時間を要する。

## 第5章 熱処理技能のデジタル化による伝承

### 5-1 はじめに

熱処理中において、鋼材内部に生じる現象を直接観察することは難しい。したがって、熱処理技能に関するノーハウは、条件とその結果がいかなるものであったかといったことのみで伝承されてきた。その後、鉄鋼の相変態に対する研究が進むと、この現象に関しては TTT 線図や CCT 線図を用いた分かりやすい解説がなされるようになった。ところが、熱処理変形と残留応力に関しては簡便な説明が容易ではなく、現在でも一般には単に経験を語り継ぐだけの状況となっている。

一方で、熱処理シミュレーションが利用できる場合には、コンピュータ内でのモデルとしてではあるが、相変態だけではなく熱処理変形や残留応力の発生の状況をつぶさに観察することが可能となっている。しかし、このシミュレーション技術、さらには変形や応力の発生メカニズムを一般の熱処理技術者が理解するためには、いまだに越えなければならない問題が山積している。ここでは、デジタル化技術を用い、熱処理変形、残留応力などの発生メカニズムをビジュアルに解説し、さらには熱処理技能を伝承していくための方法の確立を目指す。

### 5-2 熱処理変形・残留応力の発生のビジュアル化とそのメカニズムの説明

#### 5-2-1 研究目標および成果の概要

本研究では、熱処理技術者に対して各種部品形状における熱処理変形と残留応力の発生理由を解説するためのプレゼンテーション資料の作成を行なう。現象をより分かりやすくするため、そこには実験の様子ビデオ、シミュレーション結果のアニメーションなどを加える。作成されたプレゼンテーションの一部は、技術者の教育用に広く供せられるものとする。本テーマに対する18年度の目標は以下の通りである。

(有)アリモテック、国立大学法人宇都宮大学と大阪府立工業高等専門学校が、節2-2の検証例の一部に対し、その結果をビジュアルに説明するための教育用パワーポイント資料を作成する。2件程度を目標とする。

以下の各項に述べるように、本年度は、熱処理変形や残留応力に関する基本事項を解説したプレゼンテーションを作成した。また、熱処理シミュレーションによる解析結果の分析とポスト処理により、熱処理変形・残留応力の発生現象をビジュアル化した。

#### 5-2-2 熱処理変形・残留応力に関する基本事項の説明

ここでは、熱処理変形や残留応力に関する基本事項を解説するためのプレゼンテーション作成の目的とその概要について記す。

##### (1) 熱処理変形・残留応力に対する解説の現状

熱処理について初心者向けに解説した書籍は多数出版されている。その典型的なものとして、たとえば(社)日本熱処理技術協会が著者となっている“熱処理ガイドブック”<sup>(27)</sup>を取上げてみる。この著作のまえがきには、“技術者に対して熱処理技術の要点を実際に則して平易に解説したものである”との表明がなされている。

このガイドブックでは、金属の組織、鋼材選定、熱処理設備材料試験法などについては懇切な解説がなされている。しかし、熱処理変形に関する記述は、熱処理欠陥と対策の章に若干含まれ

る程度である。また、残留応力の発生に関しては、ほとんど説明がなされていない。熱処理変形に関する記述は、具体的には、過去の経験のまとめ、実際の部品での測定データなどである。本文には、焼入れにおける変形に関して以下に示す内容が記されている。

“機械加工により焼入れ前に変形が生じている場合が多いが、焼入れの際の熱ひずみ、変態ひずみなどが重なって変形はさらに大きくなる”

また、高周波焼入れに関する変形に関し、以下に示す内容の解説がなされている。

“形状の複雑な部品では、加熱冷却にともなって生じる熱応力と変態応力が複雑に影響して、ときに大きな変形を生じる”

上記のいずれの記述にも、その前後において、熱ひずみ、変態ひずみ、熱応力および変態応力の内容に関する説明はない。なお、この書籍では、別の部分において“熱処理ひずみ”と“熱処理変形”が同じ現象を表わす用語として用いられている。

少し古いが、日本鉄鋼協会の編集になる指導書“鋼の熱処理”<sup>(28)</sup>には、“焼入れによるひずみ”に関して以下の記述がある。

“焼入れで生じる **distortion** (ひずみ) は組織変化に伴う寸法変化—**size distortion**—と急冷時の熱応力、変態応力による形状変化—**shape distortion**—とからなる。一般に、熱応力による形状変化を熱ひずみ、変態応力による形状変化を変態ひずみというから、この場合の形状変化は急冷による熱ひずみと変態ひずみからなるということがいえる”

以上のような解説だけで、熱処理変形と残留応力の意味が真に理解できる読者は多くはないと考える。少なくとも、このような記述だけでは、変形や応力に対する具体的な数値を求めるのは困難である。このように、熱処理の入門書あるいは指導書における説明の不足が、一般の熱処理技術者にとって熱処理変形と残留応力に関する理解が進展しない理由の一つとなっていると考えられる。

## (2) 熱処理シミュレーションにおける熱処理変形・残留応力

負荷状態の弾性体に生じる応力とひずみ、さらには変形の量は、古くからの研究によって完成された弾性力学から答えを得ることができる。弾性力学では、原子から構成される物質を連続体と見なし、その微小部分に対して応力とひずみを定義する。このような連続体近似によって、各部の変位や応力が微分方程式を解くことによって求められる。

弾性力学で定義される“ひずみ”は **strain** であり、前出した **distortion** に対応するひずみとは明確に異なるものである。**distortion** については同時に“変形”という用語が使用されているので、こちらの方が **strain** と混乱することが少ないものとする。したがって、“熱処理ひずみ”ではなく、“熱処理変形”を用いた方が、この分野での厳密な議論がしやすくなる。

実際の材料では、応力がある限界に達すると塑性現象を生じるが、このことを対象とする塑性力学がすでに確立している。なお、通常の熱処理技術者が、その教育の背景から考えて、弾性力学はともかく塑性力学を学習する機会はまだであると考えられる。

熱処理シミュレーションは、簡単にいうと、熱処理現象をコンピュータで取扱えるように弾性力学や塑性力学を発展させたものである。したがって、このシミュレーションでは、熱処理対象物の各部での応力やひずみが時々刻々求められている。図 5.1 では、熱処理中の任意の時刻  $t$  における物体内部での応力とひずみ、さらには変形、温度、相変態の関係を示している。なお、弾性力学の範囲では、ひずみは弾性ひずみのみである。この弾性ひずみと応力の間には、常に線形の

関係が成立つものとする。

物体に温度分布が生じているような場合には、熱ひずみが発生する。弾性体では弾性ひずみと熱ひずみを加算したものが全ひずみとなり、これを物体の内部で総和することによって実際の変形が求められる。なお、外部から荷重が加わらない場合、温度分布と物体の拘束によって生じる応力を“熱応力”と呼ぶことができる。

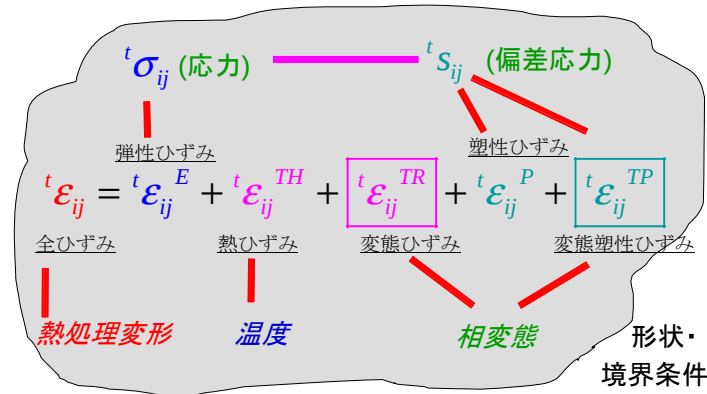


図 5.1 熱処理変形と応力・ひずみの関係

急冷などによって物体の内部で応力が上昇し、その局部でせん断ひずみエネルギーがある限界に達するとそこには塑性現象が生じる。その場合、図 5.1 に示す塑性ひずみが、該当位置での偏差応力に基づいて発生することになる。なお、応力の偏差成分は弾性ひずみの偏差成分に対応するものであるが、弾性ひずみの偏差成分には体積膨張・収縮の効果は含まれない。塑性ひずみが応力の偏差成分に関係しているということは、塑性変形の本質である体積不変の条件が表現されていることになる。いずれにしても、塑性ひずみが生じることによって、応力・ひずみそして変形に関する現象は複雑となる。

熱処理においては、さらに金属の相変態が生じるので、図 5.1 に示すように相変態ひずみを考慮する必要がある。相変態ひずみは、たとえばパーライトがオーステナイトに変態する場合の結晶構造の変化を、微小部分の体積変化として表現したものである。この他に、相変態中には変態塑性ひずみが生じるが、これは小さな応力状態であっても相変態の効果によって塑性変形が生じる現象である。

以上に述べた現象が、シミュレーションソフトによって時々刻々計算される。

### (3) 熱処理変形・残留応力の発生メカニズムについての説明の意義

熱処理シミュレーションソフトを単に使用する上では、弾性力学や塑性力学、さらにはそれを相変態が含まれるものに拡張した理論についてそれほど意識する必要はない。ユーザは決められたデータを入力し、ソフトから得られる最終的な変形や応力状態などの結果を確認するだけでよい。このようなソフトの利用の仕方は、単に実験をコンピュータにやらせているのと同じで、いわゆる“数値実験”と呼ばれるものである。なお、パラメータを振って、数値実験を行なうことによって、種々の有益な情報が得られることになる。

しかし、熱処理シミュレーションは、現実をかなりの精度でモデル化したものであるので、ある結果が生じたとすれば、その発生理由を残されたシミュレーション結果から説明することが可

能である。形状が複雑な場合には容易ではないが、図 5.1 に示した各種のひずみの平衡式や弾性ひずみと応力の関係、さらには温度、各相の体積分率、変形の時々刻々の結果を分析すればこのことは可能である。

たとえば、図 5.2 には、節 2-2 で触れたキー溝付き鋼円柱（S45C）の水焼入れ実験<sup>(29)</sup>に対し、その時々刻々の形状変化の画像とそれに対応するシミュレーションの変形図を示す。この実験では熱処理中の変形状態の観察が可能であったが、実際の熱処理では結果のみが得られるだけである。この場合、キー溝は図の左側に設けられており、この方向から見て円柱は最終的に凸に変形した。

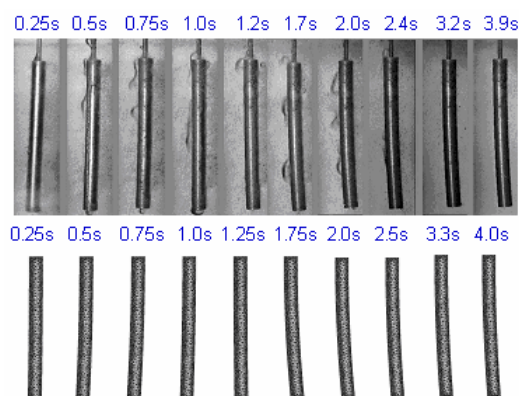


図 5.2 キー溝付き鋼円柱の水焼入れ時の変形挙動  
(上図：実験，下図：シミュレーション)

通常の生産部品では、このような極端な熱処理変形が生じることはない。しかし、熱処理技術者が、このような曲り変形が生じる理由を理解しておくことは有益ではないかと考える。確かに、この変形は現象としてシンプルであり、通常、技術者を悩ませている複雑な変形とは異なる。しかし、簡単なものについて理解せずに複雑なものの解釈に進むことには無理がある。

キー溝付き円柱の焼曲りのメカニズムについては、すでに発表がなされている<sup>(29)</sup>。簡単にいうと、冷却中にキー溝側に正の軸方向塑性ひずみが蓄積するが、全体が室温に達するとこのひずみが卓越し、キー溝側を縦方向に膨張させようとする効果が生じるということになる。詳細には、すでに図 5.1 に示した各種ひずみの平衡式を時々刻々と軸方向成分について追跡すれば、その理由を厳密に説明することができる。なお、この円柱は完全冷却時にすべてがマルテンサイトとなるので、相の密度差による曲りは生じない。

塑性ひずみが曲りの原因であるとすれば、曲りを小さくするにはこれを小さくすることを考えればよい。このことは、できる限り冷却を緩やかにすることによって実現する。すでに、ポリマー水溶液と油による焼入れ実験が行なわれており、冷却が緩やかになると焼曲り量が低下するという結果が得られている。また、そのシミュレーション結果より、ポリマー水溶液と油による冷却の過程で生じる正の塑性ひずみの発生量は、水焼入れの場合に比べて小さいことが明らかとなっている。

熱処理シミュレーションの結果を分析することによって、この他にも焼入れ円柱の残留応力分布および長さや直径の変化<sup>(30)</sup>、さらにはリングの浸炭焼入れ<sup>(31)</sup>あるいは高周波焼入れ<sup>(32)</sup>における熱処理変形と残留応力分布の変化のメカニズムが説明されている。これらの結果には、個々の熱

処理方法において熱処理変形の低減と残留応力の最適化を行なうためのヒントが含まれているものとする。

#### (4) 弾塑性現象の解説方法

熱処理シミュレーションを数値実験手法としてだけでなく、熱処理現象のメカニズムを解明するために用いる場合には、応力やひずみに関するより深い知識が必要となる。しかし、一般の熱処理技術者に対し、弾性力学と塑性力学を分りやすく解説した著作は見当たらない。本テーマでは、このような目的のために弾塑性現象を分りやすく説明するためのプレゼンテーションの作成を目指している。

#### 5-2-3 熱処理変形・残留応力のビジュアル化

熱処理シミュレーションによる解析結果の説明のため、ポスト処理によって熱処理変形・残留応力の発生現象をビジュアル化した。図 5.3 は、節 2-2 の検証例として取り上げた焼曲り変形のシミュレーション結果に対するものである。変形を支配する各種のひずみを分離してそれぞれの分布の時間的変化を温度分布や組織分布の時間的変化と並べて表示した。このようなアニメーションは、焼入れ時の変形が発生するメカニズムを理解するのに有効であることが確認できた。

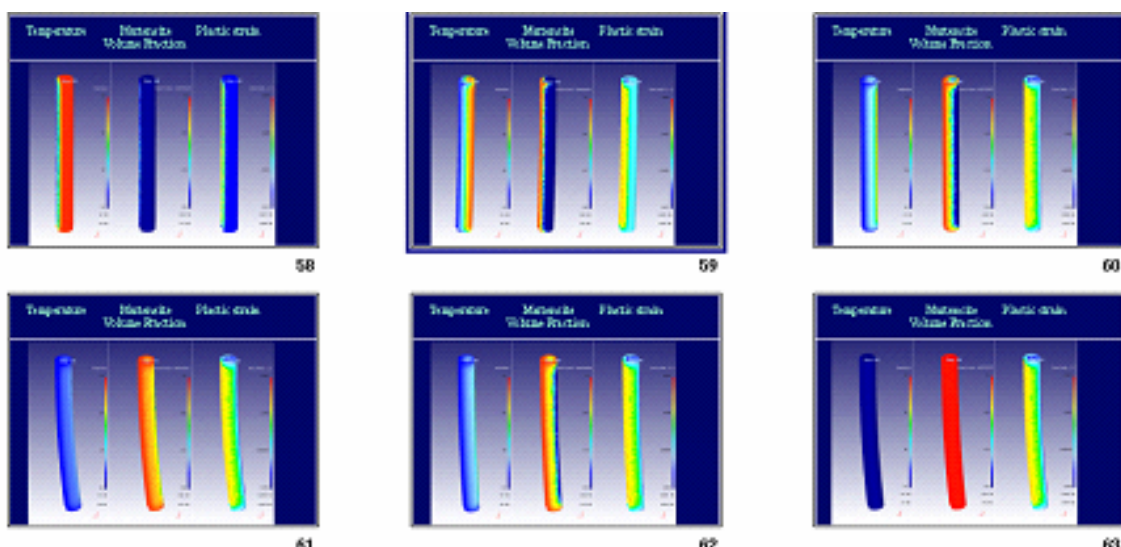


図 5.3 鋼軸（キー溝付き）の焼曲り変形のアニメーション

#### 5-3 熱処理に対する勘と経験のデジタル化とシミュレーションによる解説の共有

##### 5-3-1 研究目標および成果の概要

熱処理の生産現場で蓄積されてきた過去の勘と経験に関する知識を集約し、できるだけ忠実に記録しておくことは、将来の熱処理技術の発展のために意味がある。今後も同種の熱処理が行なわれる可能性の高いものを優先し、部品の形状寸法図、材質、熱処理条件、熱処理の結果などの情報をデジタル化する。重要性の高い事例に関してはシミュレーションを適用し、これと実際の結果とを比較する。シミュレーション結果についても、勘と経験の情報と対比してデジタル保存する。このようなデジタル資料が社内の技能者に公開されることにより、過去の勘と経験に基づく貴重な知識が共有化されることになる。本テーマに対する 18 年度の目標は以下の通りである。

## シミュレーション利用技術による 熱処理の高度化手法の開発

(株)東研サーモテックと大阪府立工業高等専門学校が、過去に行なわれた熱処理作業から数件を選び、その条件と結果をデジタル化する。

以下の項に述べるように、本年度は、数件の熱処理事例に対し、部品の形状寸法図、材質、熱処理条件、熱処理の結果などの情報をデジタル化した。

### 5-3-2 熱処理事例のデジタル化

過去の熱処理事例から数件を選び、部品の形状寸法図、材質、熱処理条件、熱処理の結果などの情報をとりあえず EXCEL ファイル形式として記録した。ファイルには、できるだけ勘と経験が伝えられるように種々のコメントを記載した。(株)東研サーモテックには、百社以上もの取引先からの数万点に及ぶ受注品目に関する過去の事例が膨大な文書として残されている。これらをすべてデジタル化することは不可能であるが、重要なものを選択してデジタル化し、技術者に周知徹底させたい。

事例に対するシミュレーションの適用については、適切なものを選択して取り組む予定である。なお、デジタルデータの公表については、関係先の許可が現時点では得られていない。

## 第 6 章 全体総括

### 6-1 はじめに

熱処理に関係して発生する各種の問題は解決が困難なものが多く、統計として現われないが、日々、これによって多額の経済損失が生じているものと考えられる。古くからその解決のために多数の研究が試みられてきたが、常に新たな問題が生じて試行錯誤的な対処に追われているのが現状である。このような問題に取り組むため、近年、各国で大規模なプロジェクトが組織されている。たとえば、ドイツの Bremen 大学は変形工学(Distortion Engineering)<sup>(1)</sup>を提唱し、2001 年からこれに基づくプロジェクトを組織している。

国内においても同種の組織的な研究の必要性が認識され、関係各位の努力で、“シミュレーション利用技術による熱処理の高度化手法の開発”のテーマが、平成 18 年度の戦略的基盤技術高度化支援事業の経済産業局案件として採択された。初年度は、片側浸炭に関する一件の実験を行ない、また、測定装置やソフトを導入して試用し、次年度からの本格的な研究に備えた。しかしながら、本事業は、初年度の活動のみでやむなく終了となった。

### 6-2 研究開発の成果

単年度の活動で終わってしまったが、主な成果をあげさせていただくならば以下の通りである。

- (1) 板の片側浸炭焼入れ実験を行ない、浸炭焼入れに関する問題解決のための基礎的データを得た。
- (2) シミュレーションを問題解決にどのように活用していくかについて、その問題点と手順を明らかにした。
- (3) 熱処理変形と残留応力の発生メカニズムをいかにすればやさしく説明できるかについて考察し、その方針を示した。

多数の高度化目標や技術的目標を設定したが、結局は、本格的に取り組むことができなかった。一部のテーマについては、平成 21 年に熱処理技術協会が設置した“焼入残留応力と数値シミュレーション研究部会”において取りあげられている。

### 6-3 本分野での研究の経緯と課題

課題について考える前に、本分野における過去の研究の経緯について簡単に振り返っておく。なぜならば、この分野の研究は古くから継続してきたものであり、そのことを踏まえておかなければその課題について述べられないからである。

熱処理変形と残留応力に関する問題は、非常に古くから現場で認識され、また研究のテーマとして各国で関心が持たれた。たとえば、国内では、日本金属学会誌 1940 年 4 巻 2 号が、“鋼(炭素鋼、特殊鋼)の熱処理と歪、焼割れその他”というタイトルの特集を組み、この方面の専門部会での報告を掲載している。巻頭の報告は本多光太郎による“鋼の徐冷および急冷に伴う歪について”で、ここでは当時の理論的研究が簡潔に報告されている。引続き、焼割れ、窒化による変形、各種の熱処理変形の発表論文と、この会における討論が掲載されている。

その後、理論的研究に関しては大きな進展は見られなかったが、熱処理の残留応力の測定に関しては主にドイツ、日本、米国において地道な研究が続けられた。コンピュータの発展により状況に変化が生じ、有限要素法という手法により熱処理変形と残留応力の計算が可能であることが

各国の研究者によって明らかにされた。1990 年ごろには、フランスで商用ソフトがすで存在していたが、国内でも実用化を目指すソフトの開発がソフト関連企業において開始された。同時期に、米国では NCMS (National Center for Manufacturing Science) が国の支援を得て、主にソフトウェアの開発を目指すプロジェクトを開始させた。

その後、世界で機軸となる数種のソフトウェアがとりあえず利用可能となったが、その利用に際して求められるハードルの高さが問題となった。冷却特性、材料特性のデータや、組込まれている各種の数値モデルが適切であるかについては、実験との比較によって確認する必要がある、このことは手間と時間のかかる作業となった。

このようなシミュレーションの利用技術とその改善を重視したテーマを掲げているのが、すでに述べた Bremen 大学で開始され、現在も継続しているプロジェクトである。この Bremen 大学の発想が時勢にあっていることを認め、さらには現象のメカニズムの解明を重視し、より現場的な利用技術の開発を目指すことが、本分野における問題解決のためには必要ではないかとの考えのもとに本事業が計画された。すなわち、その時点で求められているのは新たにソフトウェアの開発を行なうのではなく、既存のものがどこまで利用可能かを確認することであると考えた。さらに、現場技術者に対して熱処理変形と残留応力がどのようにして発生するかを分かりやすく説明する技術の開発を目指すこととした。

すでに述べたように、本事業は初年度のみで終了し、その結果、国内においてはシミュレーションの利用技術を向上させるための研究の進展は大幅に低下した状態にある。したがって、本研究分野での当面の課題は、再度、各種の系統的な実験やシミュレーションとの比較などの研究作業を支援するファンドをいかに見いだすかというところにある。当面は、関係者の多くが参加している上記の熱処理技術協会の研究部会で地道な活動を継続し、新たな戦略を練ることが肝要かと考える。

#### 6-4 まとめ

本報告書は、本事業の副総括研究代表者が作成した。第 1 章から第 5 章については、基本的に平成 19 年 3 月に提出した“成果報告書”を要約することによって作成した。第 6 章の全体総括については、2 年間のブランクがあったが当時を回想し、また現在の状況を踏まえて簡潔に記載した。十分な結果を残せず残念であったが、本報告が、熱処理関係者、さらには他の分野のものづくり関係者にとっても役立つものであれば幸いである。

最後になるが、関係者を代表して本事業に関係された方々に対して謝辞を述べさせていただく。本事業は、報告書にお名前が入っている方々と、そうではない多くの方々からの熱心なご支援によって成立したことを、感謝を込めてここに書きしるしておく。

## 参考文献

- (1) Zoch, H. W., 2005, "From Single Production Step to Entire Process Chain - the Global Approach of Distortion Engineering," 1st Int. Conf. on Distortion Engineering, Bremen, Germany, pp. 3-10.
- (2) Larson, D., 1990, "Finite Element Analysis of Residual Stress and Distortion in Forged and Carburized Gear Steel", M.S. thesis T-3932, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- (3) Henriksen, M., Larson, D. B. and Van Tyne, C. J., 1992, "Modeling Distortion and Residual Stress in Carburized Steels," Proc. 1st Int. Quenching and Control of Distortion, ASM International, pp. 213-219.
- (4) Prantil, V. C., Callabresi, M. L., Lathrop, J. F., Ramaswamy, G. S. and Lusk, M. T., 2003, "Simulating Distortion and Residual Stresses in Carburized Thin Strips," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 125, pp. 116-124.
- (5) Acht, C., Clausen, B., Hoffmann, F., Zoch, H. W., 2005, "Simulation of the Distortion of 20MnCr5 Parts after Asymmetrical Carburization," 1st International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, pp. 251-258.
- (6) 田中 実, 1949, "鋼の熱処理歪に関する研究," 東京工業大学学報, 特別号(精密機械研究所報第2号), pp. 1-75.
- (7) 末広正芳, J. Ågren, 1999, "新しい相変態解析シミュレーションソフト-DICTRA," まてりあ, Vol. 38, pp.629-632.
- (8) 岡村一男, 2006, "焼入れシミュレーションの現状と展望-(1)材料特性とデータベース," 材料, Vol. 55, pp. 529-535.
- (9) 岡村一男, 2004, "熱処理変形シミュレーションに用いる材料特性," 工業加熱, Vol. 41, pp. 22-28.
- (10) 岡村一男, 2002, "熱処理シミュレーションに必要な材料特性とデータベース," 熱処理, Vol. 42, pp. 319-325.
- (11) Wever, F. und Rose, A., 1954/56/58, "Atlas zur Warmenbehandlung der Stähle," Verlag Stahleisen.
- (12) Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., and Klemens, P. G., 1970, "Thermophysical Properties of Matter - Vol. 1 Thermal Conductivity: Metallic Elements and Alloys," IFI/Plenum, New York.
- (13) Touloukian, Y. S., and Buyco, E. H., 1970, "Thermophysical Properties of Matter - Vol. 4 Specific Heat: Metallic Elements and Alloys," IFI/Plenum, New York.
- (14) Touloukian, Y. S., Kirby, R. K., Taylor, R. E., and Desai, P. D., 1975, "Thermophysical Properties of Matter - Vol. 12 Thermal Expansion: Metallic Elements and Alloys," IFI/Plenum, New York.
- (15) 原 隆啓, 高田正男, 太田邦夫, 烏谷 徹, 1963, "鋼種による熱応力亀裂の発生度合を比較するための高温弾性率および熱膨張率の測定," 鉄と鋼, Vol. 49, pp. 1885-1891.
- (16) Frerichs, F., Landek, D., Lübben, Hoffmann, T., F. and Zoch, H. W., "Prediction of Distortion of Cylinders without Phase Transformations," 1st International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, 2005, pp. 415-423.
- (17) 米谷 茂, 1975, "残留応力の発生と対策," 養賢堂.
- (18) 須藤 一, 1988, "残留応力とゆがみ," 内田老鶴圃.
- (19) 川崎一正, 田村久司, "ハイポイドギヤの熱処理変形に関する研究--熱処理変形の検出とそれを見込んだ歯切法の提案", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 61, 1995, pp. 1685-1690.
- (20) 磯村良蔵, 佐藤初吉, 1961, "焼入れ応力より見た焼割れ現象について," 日本金属学会誌, Vol.25, pp. 360-364.
- (21) Bühler, H. und Herrmann, E., 1964, "Relations between Dimensional Changes and Internal Stresses during the Heat-Treatment of Tool Steels," Arch. Eisenhüttenwes., Vol. 35, pp. 1089-1095, (in German).
- (22) 三木田 嘉男, 河野良明, 中林一朗, 森 年史, 坂巻清司, 1988, "焼割れ感受性に及ぼす試験片の形状効果," 徳大工学部研究報告, No.33, pp. 39-49.
- (23) 井上達雄, 原口賢一, 木村茂人, 1976, "焼入れ・焼もどし過程の応力解析," 材料, Vol.25, pp. 521-526.
- (24) 三木田 嘉男, 中林一朗, 1986, "Polyethylene Glycol 系ポリマー焼入れ液の冷却特性と焼割れ感受性," 日本機械学会論文集, Vol. 52, pp. 229-232.
- (25) Melloy, G. F., 1965, "Development of an Improved Forged Hardened- Steel Roll Composition," Iron and Steel Engineer, May, pp. 117-126.
- (26) 奈良崎道治, 淵澤定克, 小河原稔, 1993, "鋼の焼割れに及ぼす表面粗さおよび表面微細形状の影響," 熱処理, Vol. 33, pp. 56-63.
- (27) 日本熱処理技術協会, 2002, "熱処理ガイドブック," 大河出版.
- (28) 日本鉄鋼協会, 1969, "鋼の熱処理," 改訂5版, 丸善.
- (29) 有本享三, 奈良崎道治, 2002, "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, Vol. 42, pp. 346-352.
- (30) Arimoto, K., Horino, T., Ikuta, F., Jin, C. and Tamura, S., 2005, "Explanation of the Origin of Distortion and Stress Distribution Patterns in Water-Quenched Chromium Steel Cylinders Using Computer Simulation," Proc. 2005 Heat Treating Conference, ASM International, pp. 253-262.
- (31) Arimoto, K., Yamanaka, S. and Funatani, K., 2006, "Explanation of the Origin of Distortion and Residual Stress in Carburized Ring Using Computer Simulation", 15th Congress of IFHTSE, Vienna, paper no. MN7.
- (32) Horino, T., Ikuta, F., Arimoto, K., Jin, C. and Tamura, S., 2005, "Explanation on Origin of Distortion in Induction Hardened Ring Specimens by Computer Simulation," 1st International Conference on Distortion Engineering, Bremen, Germany, pp. 203-212.