

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「SK, SKS鋼製プレス金型の熱処理歪み抑制・修正技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 1月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社信州TLO

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 油冷鋼プレス金型の歪み抑制を実現するための焼なまし、均一焼入れの連続処理手法の開発	11
2-1-1 高圧窒素ガス急冷却真空炉の開発	12
2-1-2 焼なましによる加工応力除去効果の検証	13
2-1-3 ガス急冷による均一焼入れと限界冷却時間の検証	15
2-2 TP(温度・加圧力) 可変歪み修正装置の開発と検証	17
2-2-1 TP(温度・加圧力) 可変歪み修正装置の設計および開発	17
2-2-2 TP可変歪み修正装置を用いた温度・加圧力条件の検証	19
2-3 シミュレーション技術を用いた金型の熱処理における挙動把握	21
第3章 全体総括	24
3-1 研究開発後の課題	24
3-2 研究開発後の事業化展開	24
参考文献	25

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究の背景

自動車産業をはじめ電気機械・輸送機械・精密機械等の我が国の産業は、グローバル化にともなう価格競争が激化する中で、市場ニーズに先行する新商品をスピーディに開発し、魅力的な価値・価格の商品を提供することが業界で勝ち抜く鍵となっている。これら産業での主力部品である金属プレス加工部品は、プレス用金型(以下、金型)を用いて加工されており、その金型には高硬度、高耐久性(長寿命)、高精度であることが求められている。このため、金型の硬度を制御する「熱処理」は金型の製造において必要不可欠な工程である。

本研究開発の実施者は、平成22年度 戦略的基盤技術高度化支援事業「金型の熱処理における歪みの極小化技術の研究開発」で採択されて研究開発を完了し、ガス冷却で焼入れ処理を行う空冷鋼(SKD11 等)の熱処理歪みを0.03mm(A3サイズ)とする技術を開発した(特願 2011-119731「熱処理装置および熱処理方法」、特願 2011-188607「熱処理方法」にて出願済)。その後、国内初の極小歪み熱処理加工サービスを平成23年10月より開始している。このサービスでは、熱処理を高品質・短納期で提供しており、従来顧客に加え、新規顧客の引き合いが相次いでいる。しかしながら、焼入れ処理時に油で冷却する油冷鋼(SK鋼、SKS鋼等)に対しては、組成・材質の違いから、空冷鋼で得たこの技術を適用することができない。

我が国で生産される金型の中で、安価な油冷鋼は、空冷鋼の約2倍のシェアを占めている。しかしながら、油冷鋼を用いたプレス金型は、現在用いられている熱処理の手法(油焼入れ)では、0.3~1.5mm(A3サイズ)の歪みが生じる上、空冷鋼には見られない凸部が、表面に局部的に発生する。このため所望の金型精度を得るために、熱処理後、平面出し研磨や加工部の微調整が必要となり、この工程に約2日を要している。

例えば、ロックウェル硬度(HRC)10以下のSK,SKS等の油冷鋼を熱処理した場合、硬さは約6倍(HRC60前後)に調整されるが、この硬度での平面出し研磨や加工部の微調整の作業は、困難を極める。現行では、研磨のために、0.3~1.0mmの研磨しろを付加し調整を行っているが、CBN(立方晶窒化ホウ素)工具など高価で特殊な切削工具が必要となる上、消耗も激しいため製造コストは高くなり、更に産業廃棄物となる多量の使用済み切削液を排出するため、環境負荷も大きい。

本研究開発では、油冷鋼を用いたプレス金型の熱処理における歪み抑制技術(A3サイズで0.03mmレベル)を確立する。

(2) 研究の目的

本研究開発の目的は、金型の熱処理工程において必然的に発生する歪みを極小化(ゼロディストーション)させることで、後工程での平面出し研磨や微調整などの仕上げ加工を排除し、金型製造工程の納期短縮、低コスト化に寄与することである。また、後工程での切削研磨作業が減ることにより、金型の残留応力が減少し、金型の経年変化が減少する。これにより、川下製造業者では、金型を使って生産する製品の精度が向上し、また納期の短縮が実現できる。さらには高価な切削工具の消耗が減り、産業廃棄物となる多量の切削液が大幅に削減され、環境への配慮にも寄与することができる。

(3) 研究の目標

プレス用金型の鋼材としては焼入れ処理時に油で冷却する油冷鋼が全体の2/3であり、空気により冷却する空冷鋼が残りの1/3である。SKD鋼のような空冷鋼における熱処理歪みの極小化については、本研究開発の実施者において既に開発に成功している。ここでは、より歪みの発生が大きい、油による冷却を行う油冷鋼:SK鋼やSKS鋼において、歪みを極小化することを目指す。

研究の目標として、(1)油冷鋼(SK鋼、SKS鋼)のA3サイズの金型において、熱処理後の歪みが0.03mmレベル、さらに、(2)焼入れ、歪み修正、(必要に応じて)サブゼロ処理、焼き戻しなどの熱処理の全工程での時間を、従来の2/3とする。

【高度化指針で定める高度化目標】

「(十六)熱処理に係る技術」において達成すべき高度化目標として、当提案は「(5)その他」に関する事項の「②高度化目標」の内、以下の項目に寄与するものである。

ア. 歪み予測、歪み抑制技術、歪みばらつき抑制技術の向上

金型製造において、熱処理以前における精度は、最新の研磨装置・工具を使用しても、薄板(1mm以下)で0.005~0.015mm、それ以上の厚さのものでは±0.005mmが限界とされている。熱処理後の油冷鋼の金型の精度としては空冷鋼で実現した「A3サイズ金型で熱処理後の歪み0.03mm以下の精度」が要求され、この精度を達成すると熱処理後の仕上げ研磨・微調整加工はほぼ不要となる。よって当研究開発では、「油冷鋼における熱処理後の歪み0.03mmレベル」の熱処理法の確立を目標とする。

カ. 熱処理時間の短縮及び省エネルギーに資する技術開発

従来手法においては、焼入れ処理、歪み修正処理、(必要に応じて)サブゼロ処理、焼き戻し処理の順に作業を行い、約15時間が必要であった。当研究開発での手法では、この時間を2/3にすることを目指す。これにより、高温の電気炉での処理時間が短縮されるため使用電力が削減され、省エネルギーへ大きく資することとなる。更に、熱処理後に半日~2日要していた仕上げ加工も、不要もしくは、僅かな時間でできるため金型の製造に要する時間は大幅に短縮できる。

ク. 熱処理関連装置技術の向上

“油冷鋼における熱処理後の歪み0.03mmレベル”を実現するために、①『ガス急冷却技術』による加工残留応力除去のための焼なましと均一焼入れを実現する高度化装置の導入。②『TP(温度・加圧力)可変歪み修正技術』によるマルテンサイト変態温度域での温度制御をしつつ、可変加圧力制御による歪み修正を実現する装置の開発を行う。

以上より、当研究開発では、「熱処理技術における高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法」として、「(1)高度化・高付加価値化に対応した技術開発の方向性 ①歪み予測・歪み抑制に資する技術の開発」のうち、「ア. ゼロディストーションを目指す超低歪技術」を実施するものである。

実際の研究開発の作業においては、以下の項目において、それらの目標を定める。

<研究開発に関する研究開発項目(サブテーマ)>

【①】油冷鋼プレス金型の歪み抑制を実現するための焼なまし、均一焼入れの連続処理手法の開発
本項目においては、以下を目標とする。

- ・油冷鋼の焼入れにおいて、ガス冷却により、油冷却と同等の硬さおよび歪みを実現する。
- ・TP 可変歪み修正装置との連携において、熱処理の全工程の処理時間を 2/3 にする。

【①-1】高圧窒素ガス急冷却真空炉の開発

焼入れの前にあらかじめ焼なましにより金型の加工応力を除去し、さらに連続して均一焼入れを実行できる機能・構造を持つ高圧窒素ガス急冷却真空炉を、設計・開発する。

実施にあたっては、次を目指す。

- ・高圧窒素ガス急冷却真空炉の設計を完了し、設計資料を作成する。
- ・高圧窒素ガス急冷却真空炉の製作を完了し、目標値に対して、正しく動作することを確認する。

【①-2】焼なましによる加工応力除去効果の検証

加工応力を限りなく取り除く最適加熱温度・徐冷プロファイルを検証する。

実施にあたっては、次を目指す。

- ・焼きなまし後の残留応力を±50MPa 以下にする。

【①-3】ガス急冷による均一焼入れと冷却ガス圧の検証

冷却ガスの圧力と層流を制御して、最適均一焼入れ条件および冷却ガスの制御条件を検証する

実施にあたっては、次を目指す。

- ・焼入れ後の硬さを確認し、最適な冷却ガス制御方法を決定する。
- ・TP可変歪み修正装置と連携した際の、最適な取り出し温度を確認する。

【②】TP(温度・加圧力)可変歪み修正装置の開発と検証

本項目においては、以下を目標とする。

- ・油冷却する鋼(SK鋼、SKS鋼)のA3サイズの金型において、熱処理後の歪みを0.03mm レベルにする。

【②-1】TP可変歪み修正装置の設計および開発

油冷鋼の熱処理時の歪みと局部的に表面に生じる凸部を抑制するために、金型をプレスし、その際の圧力・温度を可変するTP可変歪み修正装置を設計・開発する。

実施にあたっては、次を目指す。

- ・TP可変歪み修正装置の設計を完了し、設計資料を作成する。
- ・TP可変歪み修正装置の製作を完了し、目標値に対して、正しく動作することを確認する。

【②-2】TP可変歪み修正装置を用いた温度・加圧力条件の検証

熱処理後の金型の歪み0.03mmレベル(A3サイズ)を実現する修正条件(プレス圧力,温度)を見いだす。

実施にあたっては、次を目指す。

- ・油冷鋼について、最適な修正条件を明らかにする。

【③】シミュレーション技術を用いた金型の熱処理における挙動把握

本項目においては、以下を目標とする。

金型の熱処理条件によるデータ(歪み・硬さ・内部組織・内部応力など)を用いて、シミュレーション(熱伝導解析、弾塑性解析、金属変態速度式など)を実施し、熱処理時の金型の挙動を把握する。

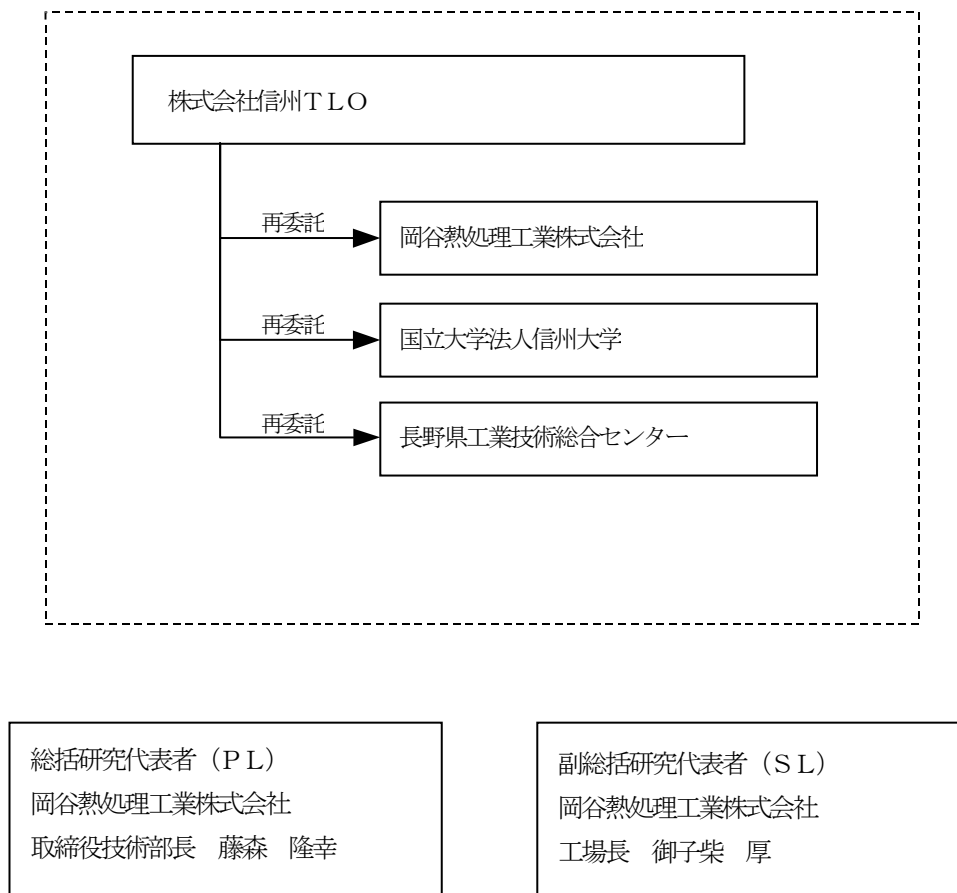
実施にあたっては、次を目指す。

- ・熱処理後の金型の歪み、硬さや残留応力などの分布(傾向)を、シミュレーションにより可視化させる。

1-2 研究体制

(1)研究組織及び管理体制

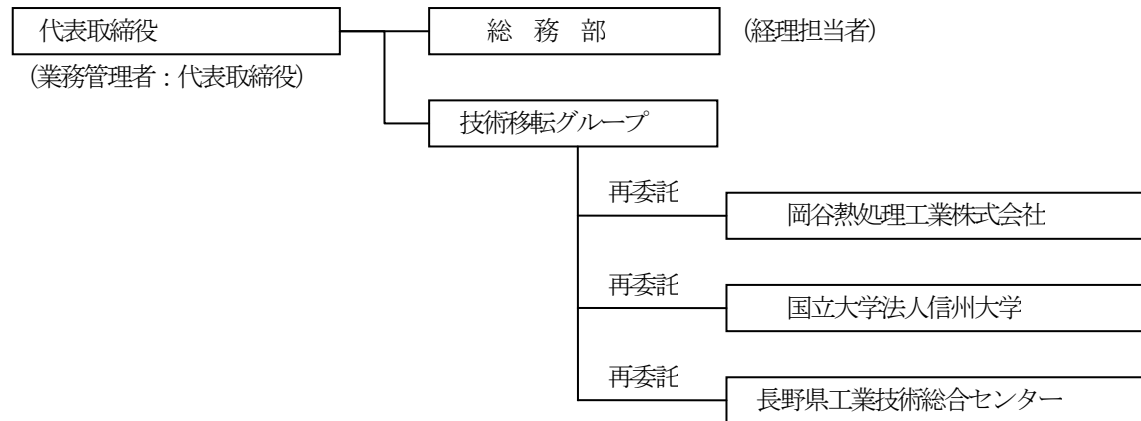
1)研究組織(全体)



2) 管理体制

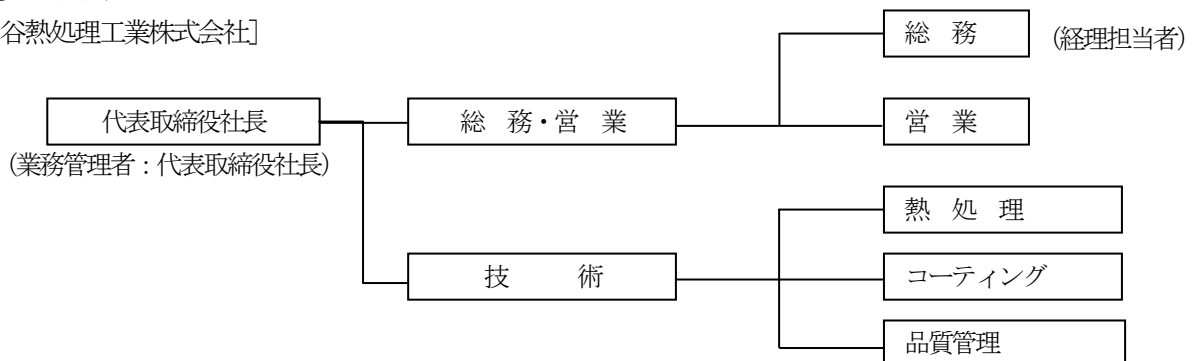
① 事業管理機関

[株式会社信州TLO]

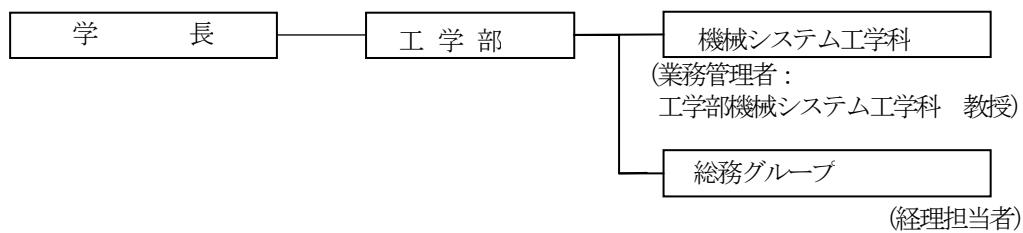


② 再委託先

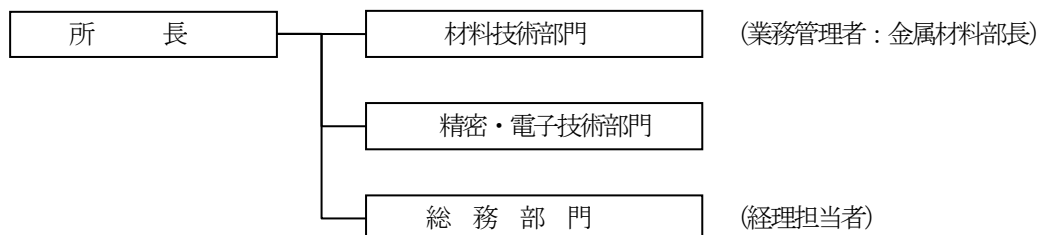
[岡谷熱処理工業株式会社]



[国立大学法人信州大学]



[長野県工業技術総合センター]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】

管理員

株式会社信州TLO

大澤 住夫
勝野 進一
横山 友美

取締役 技術移転グループ部長
技術移転グループ
総務部

【再委託先】

(研究員)

岡谷熱処理工業株式会社

西澤 邦治
藤森 隆幸
御子柴 厚
林 憲一
宮坂 清史
小口 英明
松本 圭介
中澤 信貴
市岡 一夫

代表取締役社長
取締役技術部長
工場長
技術 熱処理
技術 熱処理
技術 熱処理
技術 熱処理
技術 熱処理
技術 熱処理

国立大学法人信州大学

清水 保雄
荒井 政大

工学部 機械システム工学科 教授
工学部 機械システム工学科 教授

長野県工業技術総合センター

滝澤 秀一
若林 優治
田中 敏幸
小杉 俊

材料技術部門 金属材料部長
材料技術部門 金属材料部
精密・電子技術部門 測定部
材料技術部門 設計支援部

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社信州TLO

(経理担当者)
(業務管理者)

横山 友美
倉科 喜一

総務部
代表取締役

(再委託先)

岡谷熱処理工業株式会社

(経理担当者)
(業務管理者)

海瀬 民子
西澤 邦治

取締役 総務部長
代表取締役 社長

国立大学法人信州大学

(経理担当者)
(業務管理者)

大月 克幸
清水 保雄

工学部 総務グループ 主査
(会計担当)
工学部 機械システム工学科 教授

長野県工業技術総合センター

(経理担当者)
(業務管理者)

柳原 秀一
滝澤 秀一

総務部門 主幹
材料技術部門 金属材料部長

1-3 成果概要

本研究開発における目標としては、①SK鋼、SKS鋼製金型の熱処理後の歪み0.03mm レベルの達成、②熱処理時間が従来の2/3、の2点をあげていた。

歪みについては、開発したTP可変歪み修正装置を使うことで0.03mmレベルを達成した。また、安定的には0.05mmレベルを達成しており、実際の金型の熱処理加工で全く問題ないレベルである。熱処理の作業時間は、従来の46%と1/2以下にまで短縮することができた。これらより、研究開発全体の目標はいずれも達成できた。

以下に研究開発に関する研究開発項目(サブテーマ)ごとに、成果を述べる。

【①】油冷鋼プレス金型の歪み抑制を実現するための焼なまし、均一焼入れの連続処理手法の開発

熱処理後の歪みは、焼入れ時に発生した歪みが主であり、この焼入れ時の歪みを小さくすることで、熱処理全体の歪みを小さくすることができる。そこで、焼なましの工程を加えることで、金型内の加工応力を除去すること狙う。

しかし、焼なまし工程の追加は、処理時間が延びることとなりコストアップにつながる。また、研究開発の目標である熱処理の総時間の短縮に逆行してしまう。そこで、焼なましから焼入れまでの連続的な熱処理の開発することで、熱処理時間を短縮することを目指す。

最初の焼なましについては、金型内に残る加工応力を十分小さく減少させることが可能であることを確認できた。

二番目の焼なましから焼入れまでの連続処理については、ガス冷却による焼入れを行うことで実現を目指した。しかし、ガス冷却では十分な冷却効果が得られず、焼入れ後の硬さが不足することが判明した。

【①-1】高圧窒素ガス急冷却真空炉の開発

焼入れの前にあらかじめ焼なましにより金型の加工応力を除去し、さらに連続して均一焼入れを実行できる機能・構造を持つ高圧窒素ガス急冷却真空炉を、設計・開発した。

本装置は、冷却ガス圧力を通常の高圧冷却真空炉の2倍以上に圧力を高くすることで冷却効果を高めている。また、装置内にガス風量制御板を最適な位置に設置することでガス流の流れを良くし、これにより冷却効果を高めている。

その外観写真を、図1.1に示す。図の(a)は、正面であり、図の(b)は側面である。主な特徴は、表1.1のとおりである。本装置は、岡谷熱処理工業株式会社(長野県岡谷市)に設置し、正常に動作することを確認した。



図 1.1 高圧窒素ガス急冷却真空炉

表 1.1 高圧窒素ガス急冷却真空炉の比較

	一般焼入れ炉	高圧窒素ガス急冷却真空炉
冷却ガス制御機構	無	有 炉内温度の均一制御
ガス風量制御板	無	2~3 枚
移行時間 (ヒーターoff→ 冷却開始)	20~30 秒	即

【①-2】焼なましによる加工応力除去効果の検証

本項では、焼なまし処理後の残留応力を±50MPa 以下にすることを目標としたが、結果としては、-60MPaとほぼ近い値まで達成することができた。熱処理前の金型には、加工時の応力として、

-290～60MPa あったものが、焼なまし処理後では-60MPaに安定させることができた。

また焼なまし処理後の組織観察を行い、硬度的な際は少ないが、ベイナイト組織に崩れが生じていることを観察した。

【①-3】ガス急冷による均一焼入れと冷却ガス圧の検証

熱処理時間の短縮と効果的な歪み修正のため、高圧窒素ガス急冷却真空炉を用いた窒素ガス冷却による焼入れ処理の実現を目指した。しかし、高圧窒素ガス急冷却真空炉を用いて油冷鋼の焼入れ処理を行った場合、十分な硬度を得ることはできなかった。

本来は、高圧窒素ガス急冷却真空炉で焼なまし処理と焼入れ処理とを連続的にを行い、さらに次の歪み修正処理へ効果的に金型を受け渡すことで、熱処理加工の総時間の短縮を狙っていた。しかし焼入れ処理が十分にできないために、焼入れ処理を高圧窒素ガス急冷却真空炉で実施することについては、見送らざるを得なかった。ただし、熱処理加工の総処理時間の短縮については、今回の研究開発で開発した、TP可変歪み修正装置を用いることで、達成することができた。詳細については、項目【②-2】で述べる。

【②】TP(温度・加圧力)可変歪み修正装置の開発と検証

本項目においては、油冷鋼(SK鋼、SKS鋼)のA3サイズの金型において、熱処理後の歪みを0.03mmレベルにすることを、目標としている。また、TP可変歪み修正装置を用いることで、熱処理加工の総処理時間の短縮についても行う。

【②-1】TP可変歪み修正装置の設計および開発

油冷鋼の熱処理時の歪みと局部的に表面に生じる凸部を抑制するために、金型をプレスし、その際の圧力・温度を可変するTP可変歪み修正装置を設計・開発した。

本装置の外観を図1.2に示す。本装置は、熱処理を行う金型に対して、精密な加圧、加熱、冷却が行える機構を持っている。

装置の主な仕様を表1.2に示す。本装置は、岡谷熱処理工業株式会社(長野県岡谷市)内に設置され、正常に動作することを確認した。



図1.2 TP可変歪み修正装置

【②-2】TP可変歪み修正装置を用いた温度・加圧力条件の検証

油冷鋼製のプレス金型において、熱処理後の金型の歪み0.03mmレベルを実現する修正条件(プレス圧力、温度)を見いだすことを目指した。

油冷鋼として、SK鋼とSKS3鋼について、厚さの異なる2種類の実験用金型を用いて実験を行った。プレス圧力および修正処理温度を変え、最適値を見つけた。

この結果、熱処理後の歪み0.03mmレベルを達成することができた。焼入れ処理時の歪み量に影響されるため、安定的には、0.05mmレベルの歪み修正が可能であることを確認した。

また、このTP可変歪み修正装置を使った場合の熱処理時間について評価を行った。従来の熱処理の時間に

表1.2 TP可変歪み修正装置の主な諸元

装置概要	装置概寸	W3000mm × D2000mm × 1800mm
機能仕様	加圧有効面積	500mm × 500mm
	加圧機構	油圧
	ストローク	130mm
	加熱機構	ヒーター加熱
	冷却機構	冷却水によりステージを冷却
	圧力制御	ロードセル、シーケンサー
	温度制御	加熱上下ヒーターは、個別温度制御方式

比べて、TP可変歪み修正装置を使った場合は、約46%に短縮することができた。

【③】シミュレーション技術を用いた金型の熱処理における挙動把握

ここでは熱処理後の金型の歪みについて、シミュレーションにより可視化することを行った。

弾性解析モデル、弾塑性解析モデル、粘弾性解析モデルにより、歪み修正処理のシミュレーションを実施した。その結果、弾性解析モデル、および弾塑性解析モデルによるシミュレーションにおいて、TP可変歪み修正装置の効果を見ることができた。また、加圧の変化などによる影響についても、シミュレーションを行うことができた。

粘弾性解析モデルについては、一部、現実と合致しない結果となってしまった。これは、シミュレーションに使用する物性値のデータの精度が十分ではなかったと思われる。精度の良いデータの収集や、モデルの改良などが必要と思われる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

問合せ担当者	株式会社 信州TLO	勝野進一
住所:	〒386-8567 上田市常田3-15-1	信州大学繊維学部内 SVBL 棟 4階
電話:	0268-25-5181	
FAX:	0268-25-5188	
E-mail:	katsuno@shinshu-tlo.co.jp	

第2章 本論 ^{1)~7)}

プレス用金型を熱処理する場合、図2. 1に示すように、大きく2つの工程を行うことになる。第一がフェーズ1の「焼き入れ」処理であり、第二がフェーズ2の「焼戻し」処理である。焼入れ処理では、金型の鋼を硬くまた強さを増すように改質をしており、続く焼戻し処理において所望の硬さに戻すとともに、脆性を改善しまた靱性を増すようにしている。通常、これらの熱処理を行うと、金型に歪みが発生する。このため、金型製造業者は、熱処理後の金型に対し平面出し研磨や加工部の微調整などの仕上げ加工を施さなければならない。

今回の研究開発では、この熱処理の際に発生する歪みを極小化し、さらには熱処理に要する時間の短縮を目指す。ここでは、図の歪み修正処理を新たに開発することで、歪みの極小化を行う。

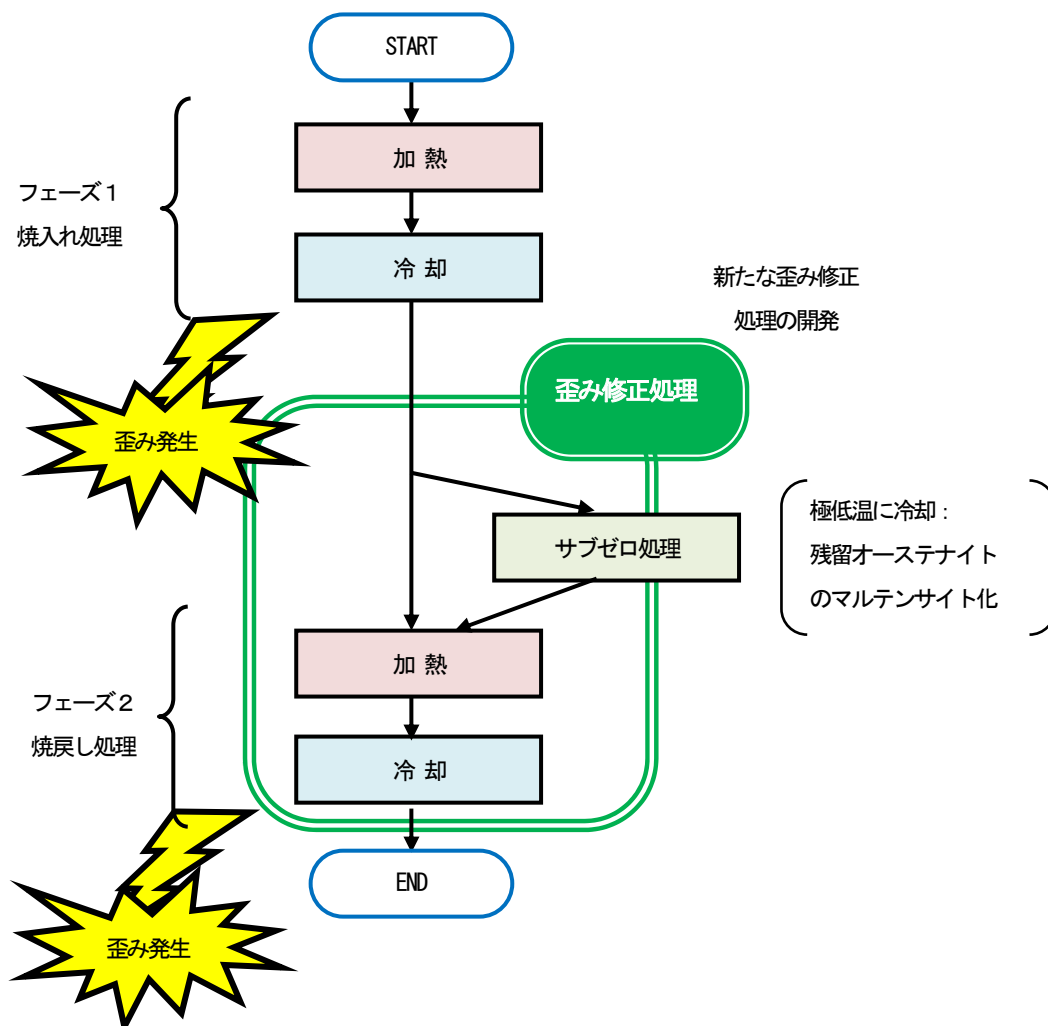


図2.1 金型の熱処理の概要

プレス用金型に用いられる鋼には、大きく油冷鋼と空冷鋼とがある。油冷鋼は焼入れの際に油により冷却するものであり、空冷鋼はガスにより冷却するものである。これらを比較した物を、表2. 1に示す。油冷鋼には炭素工具鋼であるSK鋼、合金工具鋼であるSKS鋼があり、空冷鋼にはダイス鋼であるSKD鋼がある。空冷鋼は熱処理の際の歪みが小さい利点があるが、高価である。一方、油冷鋼は熱処理時の歪みは大きいが高価である。このため金型のシェアにおいては、約2／3が油冷鋼となっている。

本研究開発と同一のメンバーにより、平成22年度サポインにおいて、空冷鋼に対する歪みの極小化技術を開発し、成功した。SKD鋼において熱処理後の歪みを0. 01mmレベルにすることに成功した。また、安定的にも0. 03mmレベルを実現する歪み修正装置を開発した。この方法は、焼入れ時と焼戻し時に温度と圧力を制御して歪みを修正する方法である。しかし、油冷鋼においては焼入れ時の冷却が油の中であるため、焼入れ時の歪み修正が行えず、十分な歪みの極小化が達成できない。また油冷鋼は割れが発生しやすく、空冷鋼における歪み修正方法を用いると、歪み修正の際に割れが発生してしまうこともある。

表 2. 1 プレス用金型の鋼材の種類と組成の比較

鋼材の種類	鋼材名	焼入れ 工法	組成の違い	備 考
炭素工具鋼	S K	油冷	0. 60～1. 50%の炭素を添加したもの。	安価であるため広く利用されているが、焼入れ性が小さく、小型工具に限られる。
合金工具鋼	S K S 1 1 (切削工具用)		炭素工具鋼に少量の W、Cr、V などを加えたもの。	Cr、W を加え硬い炭化物をつくり、耐摩耗性を向上させている。Cr は焼入性を良くしている。
	S K S 4 (耐衝撃用)			粘り強さとある程度の耐摩耗性を持たせいる。焼入れによって表面硬さ層を薄くし、内部に粘り強さを持たせている。割れやすい。
ダイス鋼	S K D	空冷	炭素工具鋼に少なくとも3%以上のCr を添加し、その他にW、Mo、Vなどを複数、加えたもの。	加工後の経年変化が少ない。Cr 炭化物を多量に分散させ、耐摩耗性を持たせている。焼入れ性が良く、空冷でも充分焼が入り、焼入歪を最低にしている。

2ー1 高圧窒素ガス急冷却真空炉の開発

(実施計画項目 ①)

熱処理後の歪みは、焼入れ処理時に発生した歪みが主であり、この焼入れ処理時の歪みを小さくすることで、熱処理全体の歪みを小さくすることができる。熱処理前の金型には加工による応力(加工応力)が残っている。この応力の影響により、焼入れ処理時に歪みが発生することが考えられる。加工時の応力を解放するためには焼なまし処理が有効である。焼入れ処理を行う前に焼なまし処理により加工時の応力を解放し、その後に焼入れ処理を行うことで、焼入れ処理時の歪みの発生を減少させることを狙う。

しかし、焼なまし処理工程の追加は熱処理の総時間が延びることとなり、加工のコスト増加につながる。そこで、焼なましから焼入れまでの連続的な熱処理の開発することで、熱処理時間の時間を短縮することを目指す。

具体的には、高圧窒素ガス急冷却真空炉により、焼なまし処理を行った後に、同じ真空炉により焼入れ処

理を行う。ここでは、油冷鋼に対して、ガス冷却により油冷却と同等の硬度と歪みを実現することを目指す。また、TP可変歪み修正装置との連携において、熱処理の全工程の処理時間を2/3にすることも狙う。

2-1-1 高圧窒素ガス急冷却真空炉の開発

(実施計画項目 ①-1)

焼入れ処理の前に、あらかじめ焼なまし処理により金型の加工応力を除去し、さらに連続して均一焼入れを実行できる機能・構造を持つ高圧窒素ガス急冷却真空炉を、設計・開発した。

本装置の最大の特徴は、高圧窒素ガスにより対象物を高速に冷却することができるものである。通常の高圧冷却真空炉では、ガス圧は1～3barであり、本装置では圧力を約2倍にすることで冷却効果を高めている。また、装置内にガス風量制御板を最適な位置に設置することでガス流の流れを良くし、これにより冷却効果を高めている。一般の焼入れ炉との比較を、表2. 2に示す。

高圧窒素ガス急冷却真空炉の外観写真を、図2. 2に示す。図の(a)は、正面であり、図の(b)は側面である。製作された真空炉は岡谷熱処理工業に設置した。その後、稼働試験を行い、正常動作することを確認した。

表 2. 2 高圧窒素ガス急冷却真空炉の比較

	一般焼入れ炉	高圧窒素ガス急冷却真空炉
冷却ガス制御機構	無	有 炉内温度の均一制御
ガス風量制御板	無	3 枚
移行時間（ヒーターoff→冷却開始）	20～30 秒	即



(a) 正面



(b) 側面

図 2. 2 高圧窒素ガス急冷却真空炉

2-1-2 焼なましによる加工応力除去効果の検証

(実施計画項目 ①-2)

焼入れ処理前に加工応力をとり除くことで、焼入れ処理における歪みの減少が期待できる。そこで、焼入れ処理前に焼なまし処理を行うことで、加工応力の除去を行う。

高圧窒素ガス急冷却真空炉により、金型に対して焼なまし処理を行い、応力除去がどの程度行えるかと、その時の金属組織の変化の様子を明らかにする。

(1) 実験方法概要

SKS3鋼製のA3サイズの試験用金型について、焼なまし処理を行う。金型は、実際の形に近づけるため、図2.3のように、9個の丸穴をあけ、金型に加工による応力が加わるようにしている。

焼なまし処理として4種類の温度で処理を行い、次の3点について確認を行う。1) 焼なまし処理の前と、焼なまし処理の後における、残留応力と残留オーステナイトの量の変化を計測する。2) 焼なまし処理の前、焼なまし処理の後、全熱処理完了後における歪みの発生状況を計測する。3) 焼なまし処理の前、焼なまし処理の後での、鋼組織の観察を行う。

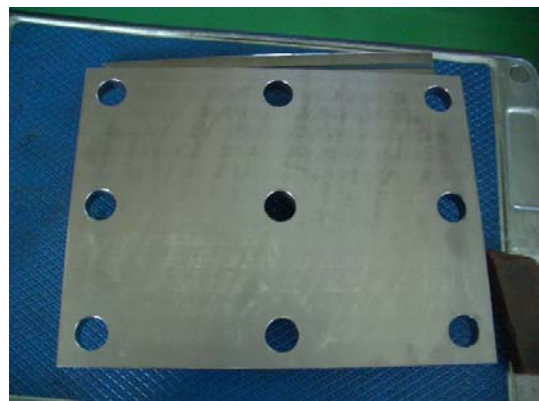


図2.3 実験用金型

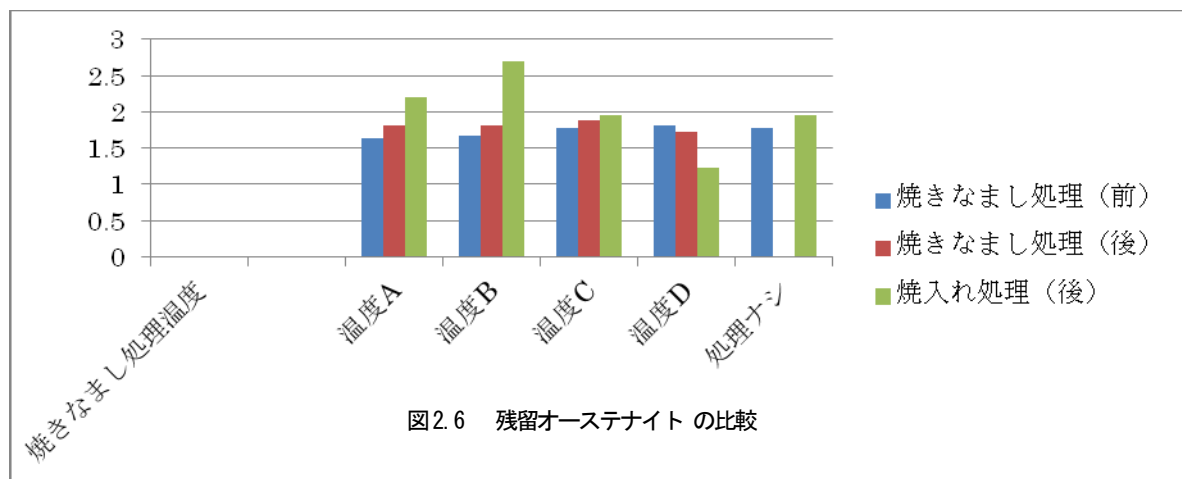
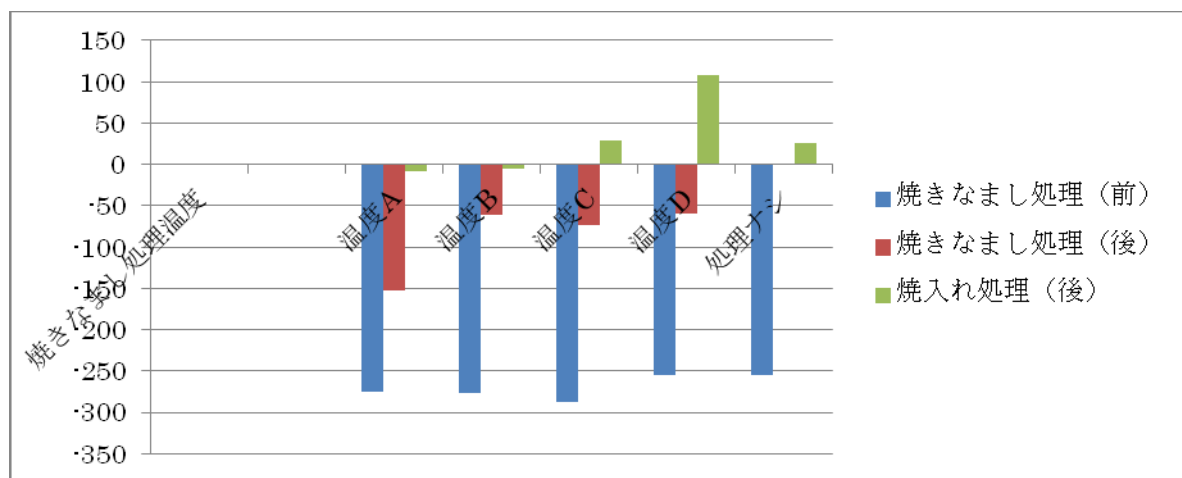
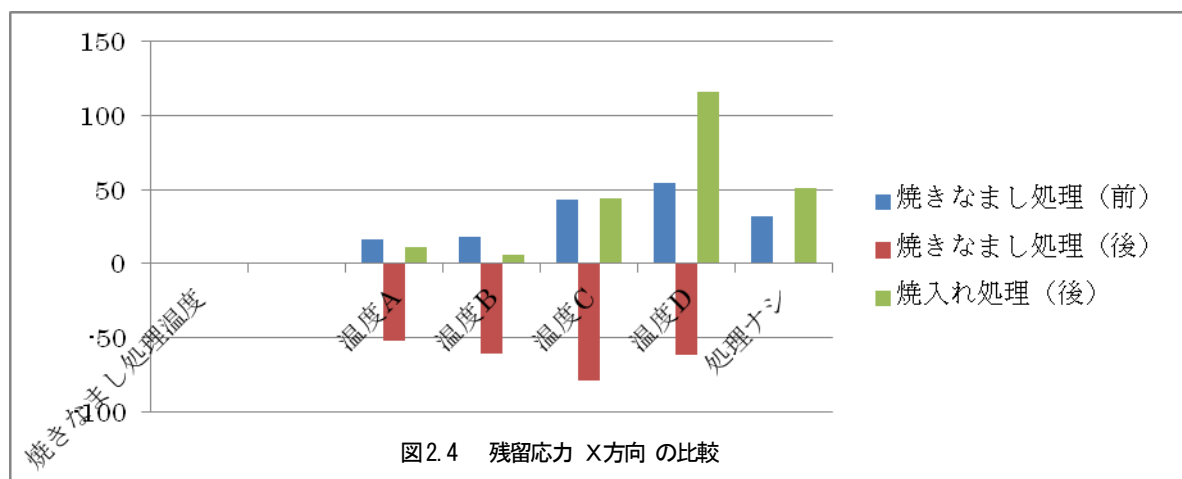
(2) 応力の測定結果

焼なまし処理を行うことでの残留応力の変化を見る。実験に用いる鋼材からサンプルを取り出し、残留応力の測定には、X線応力測定装置 iXRDを用いて行う。

測定結果を、図2.4～6に示す。焼なまし処理前の時点、焼なまし処理後の時点、および焼なまし処理の後に焼入れ処理(油冷却)と焼戻し(歪み修正)処理を行った後の時点の三つの時点において、X方向の残留応力とY方向の残留応力および残留オーステナイトの量を測定している。

X方向の残留応力、Y方向の残留応力、残留オーステナイトの量を示している。残留応力についてみると、X方向では、焼なまし前においては、10～50MPaであったものが、焼なまし後、-50～-80MPaとなり、そのばらつきが減っており、安定していることがわかる。Y方向についてみると、焼なまし前には-250～-280MPaの大きな応力があったものが、-60～-150Mpaにばらつきが減っている。特に500℃あるいは700℃で焼なましした場合には、残っている応力の量が、X方向、Y方向ともに約-60Mpaと少ない値となっている。特に、残留応力の量がX方向とY方向とではほぼ等しくなっており、これは焼入れ時の歪みの抑制に効果があると思われる。

残留オーステナイトの量について比較すると、焼なましの前と後では、その量はほとんど変化していない。焼なまし処理が残留オーステナイトに与える影響は、小さいものと思われる。ちなみに全熱処理後の残留オーステナイトをみると、焼なまし処理の温度が高い方が、残留オーステナイトの量が少ないように見える。これについても現在のところ原因が良くわからないが、今後、事業としての熱処理加工サービス提供の中で、検討したいと思う。



(3) SEM(走査型電子顕微鏡)による組織の確認^{8)~10)}

SEM 組織観察の結果を図2. 7に示す。実験供試材SKS3の焼きなまし熱処理なしのものと焼きなまし処理をしたものにおいて、共通して灰白色のコントラストで識別される未固溶のセメンタイト粒子が散在し、また母地は典型的なベイナイト組織を呈していた。析出しているセメンタイト粒子の数は試料間で、また観察された視野の位置に依存してばらつきがあるが、有為な差異があるとは言えない。

(4) 考察

以上のように、焼きなまし処理は金型内の加工応力を減少させるのに有効である。完全に応力をなくすことはできないが、X 方向 Y 方向による差が減り、また応力の値も安定する。この結果焼入れ時の歪みの発生を減らすことが可能である。熱処理の品質を一定に保つのに焼きなまし処理は有効と思われる。

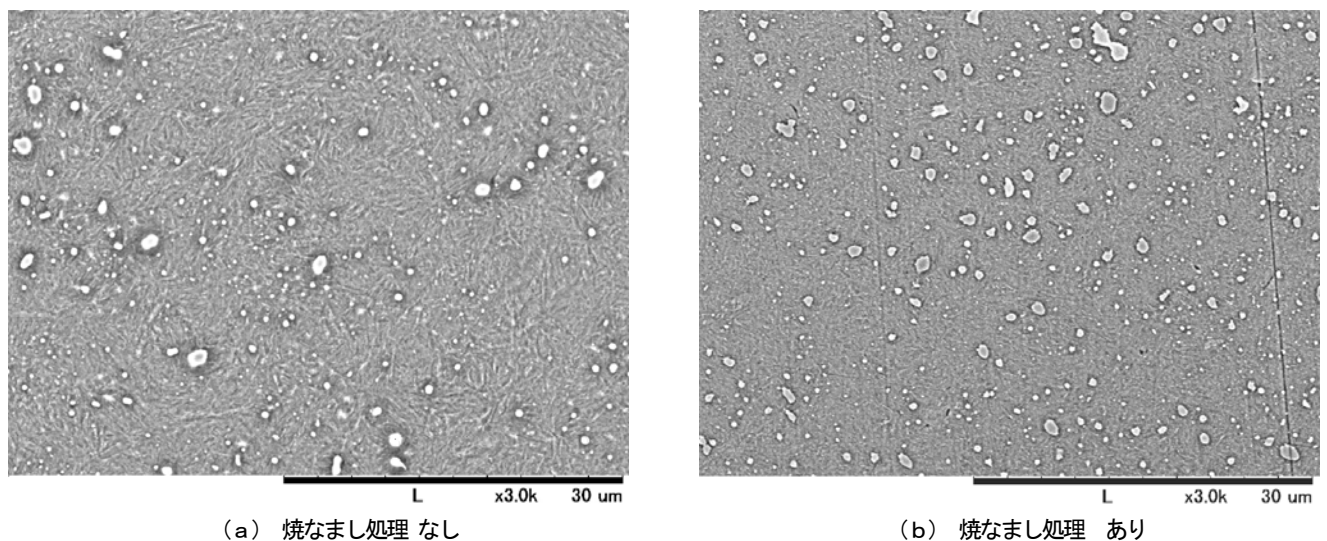


図2.7 SKS3鋼材の加工後焼きなまし熱処理の影響を示す SEM組織

2-1-3 ガス急冷による均一焼入れと冷却ガス圧の検証

(実施計画項目 ①-3)

前節でも見たように、焼きなまし処理は金型の加工応力を減少させ、焼入れ時の歪みを抑制する効果がある。焼きなまし処理を熱処理加工の中に入れることで、最終的な歪みの抑制も期待できる。

焼きなまし処理はガス冷却の真空炉で行い、油冷鋼の焼入れ処理は、油冷却の真空炉で行う。新たな処理工程である焼きなまし処理の追加は、2種類の設備が必要となり、また処理時間の増加となり、加工コストの上昇となってしまう。そこで、焼きなまし処理とその後に続く焼入れ処理とを、ガス冷却真空炉で連続的に行うことで、1つの装置で処理が可能であり、全体の処理時間も短縮できることが期待できる。

(1) 実験概要

今回開発した高圧窒素ガス急冷却真空炉を用いて、焼入れ処理を行う。前の2. 1. 1節でも述べたように、この

真空炉は通常のものに比べ、高い圧力でガス冷却が可能である。また、炉内における冷却ガスの流れについても最適化を行っており、高い冷却能力を持っている。

冷却ガス圧力との焼入れ能力との関係および、焼入れ処理を行う金型の厚さと焼入れ能力の関係を調べる。実験用金型として、SKS3鋼製のA3サイズの金型について、高圧窒素ガス急冷却真空炉により焼入れ処理を行う。冷却ガスの圧力は、低圧、中圧、高圧の3種類について焼入れ処理を行う。比較のために、油焼入れ炉による焼入れ処理も行う。

焼入れ処理を行った金型に対して、硬さの測定と残留オーステナイトの測定を行う。これらの値から、焼入れ処理が有効に行われているかを判断する。硬さの測定には、ロックウェル硬さ計を使用する。残留オーステナイトの測定には、X線応力測定装置 iXRDを用いて行う。また、焼入れ後の金型の組織状態の観察も、SEM(走査型電子顕微鏡)により行う。

(2) ガス圧と焼入れ能力の関係の実験結果と考察^{8)~10)}

硬さの測定結果を、表2. 3に示す。冷却用の高圧窒素ガスの圧力が高いほど、硬くなっていることがわかる。つまり、高圧ガスの圧力が高くなるにつれ、冷却効果が高くなり、より早い冷却が行われているといえる。

しかし、ガス冷却での硬さの値は最高でも40HRCであり、油冷鋼の65~66HRCには及ばない。

表 2. 3 ガス冷却焼入れにける硬さ

冷却方式		硬さ (HRC)
高圧窒素ガス冷却	低圧	34.3
	中圧	40.5
	高圧	40.1
油冷		66.5

表 2. 4 ガス冷却焼入れにける残留オーステナイト

冷却方式		(単位 %)
高圧窒素ガス冷却	低圧	2.35
	中圧	6.61
	高圧	8.58
油冷		27.12

次に、残留オーステナイトの測定結果を、表2. 4に示す。また、この結果をグラフにしたものを、図2. 1. 12に示す。油冷で焼入れを行った場合、約26~27%であるのに対し、高圧ガス冷却では、厚さ10mmで高圧ガスの圧力が高圧のときに、約8.5%にしか至っていない。ガス圧が低い場合には、これよりも低くなり、また厚さ20mmの場合は、厚さ10mmの場合に比べて低い値となっている。これらは、硬さの測定結果と同じ傾向であり、高圧ガス冷却では十分な冷却ができなかったことを示している。

焼入れ処理を行った金型の組織観察を、SEMにより行った結果を図2. 8に示す。SKS3鋼の油冷却による焼き入れ処理の試料および、同材を高圧窒素ガス冷却で焼き入れ処理した試料それぞれについて、同様にプレートの中央部付近からワイヤカット放電加工により切り出したφ10mm×t10mm試料について走査型電子顕微鏡(SEM)により組織観察し評価した。油冷却により焼入れした試料は典型的なマルテンサイト組織を母地に持ち、未固溶のセメンタイト粒子が散在している組織を呈した。一方、真空窒素ガス噴射冷却焼き入れした試料は、パーライトもしくはベイナイト、一部フェライトを含む母地に未固溶のセメンタイト粒子が散在している組織となっていた。このことは、真空窒素ガス噴射冷却が焼入れ条件を満たすには急冷性能の点で不足していることを示している。

(3) まとめ

SKS 鋼の焼入れ処理において、冷却油による冷却ではなく、高圧窒素ガスを用いたガス冷却を行った場合、冷却能力が不足し、十分な硬さが出なかった。前の2. 1. 2節の焼なまし処理と高圧ガス冷却による焼入れ処理とを組み合わせることで、焼入れ処理時の歪みの抑制と処理の高速化とを狙っていた。しかし、高圧ガス冷却による焼

入れ処理ができないということで、焼なまし処理との連続的な処理は困難となった。焼戻し処理における歪み修正処理で、処理プロセスの最適化を図り、熱処理加工全体の処理時間の短縮を目指すことにする。

高圧ガス冷却による焼入れ処理は、熱処理歪みの抑制技術の中では非常に重要な技術である。焼入れ処理における歪みの発生をかなり小さくできる可能性がある。また、熱処理時間の大幅な短縮も可能である。今回の実験をととして、高圧ガスによる効率的な冷却について、いくつかの知見を得てきた。今後も実験を行うことで、高圧ガスによる焼入れ処理の成功を目指したい。

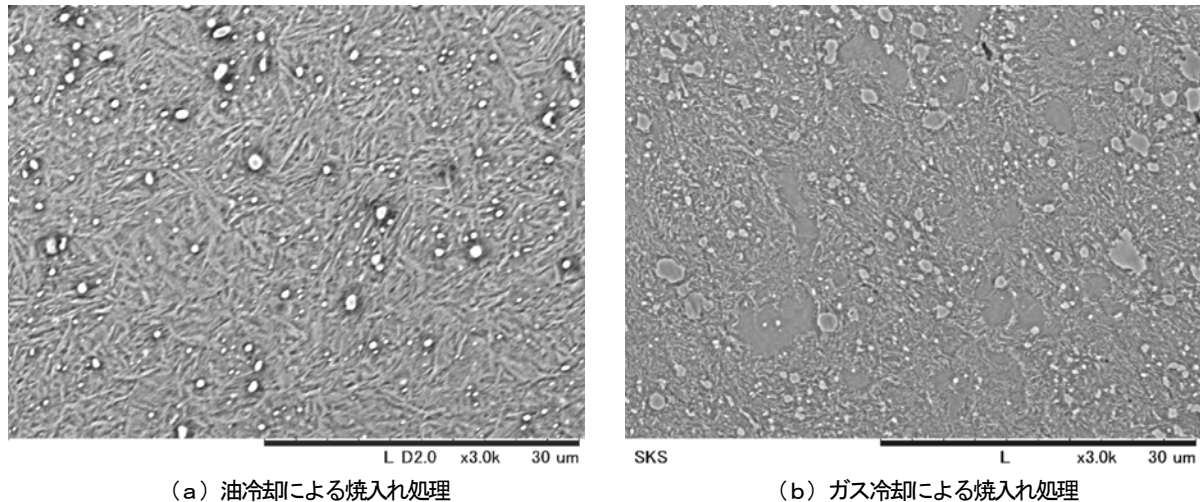


図 2.8 焼入条件の違いによる SKS3 材の SEM 組織への影響

2-2 TP(温度・加圧力)可変歪み修正装置の開発と検証

(実施計画項目 ②)

油冷鋼であるSK鋼あるいはSKS鋼に対して熱処理時の歪みを修正する、TP(温度、圧力)可変歪み修正装置の開発を行う。この装置は、熱処理加工の中の、焼入れ処理の後に使用し、焼入れで発生した歪みを修正する。

この装置では、焼入れ処理後の金型に対して精度良く温度および圧力を制御することで、歪みを修正することができる。この歪み修正装置を使用した熱処理加工において、最終的な歪みが0.03mmレベルの達成を目指す。また、熱処理加工での処理時間の短縮も目指す。

2-2-1 TP可変歪み修正装置の設計および開発

(実施計画項目 ②-1)

本研究開発メンバーは、すでに空冷鋼に対する歪み修正技術を完成させており、その際には、歪み修正用真空炉を開発している。しかし、この真空炉を油冷鋼の歪み修正に適用した場合、歪みを十分小さくすることができ

表 2.5 TP可変歪み修正装置の主な諸元

装置概要	装置概寸	W3000mm × D2000mm × 1800mm
	有効面積	500 mm×500 mm
	加圧機構 ストローク	油圧 130 mm
	加熱機構	電気ヒーター
	冷却機構	冷却水により冷却
	雰囲気	大気中
	圧力制御	ロードセル、シーケンサー
安全対策	機械正面	光線式安全装置取り付け
	上部	熱こもりを防止するために、開放
	起動	両手起動ボタン取り付け
	非常停止	非常停止ボタン取り付け 非常停止時は、ヒーターを遮断しその場停止になる。
電気仕様	電源	AC200V
	制御：	シーケンサー及びタッチパネル制御方式



(a) 正面



(b) 側面



(c) 油圧ポンプ

図 2.9 TP可変歪み修正装置の概観

ず、また場合によっては修正の際に金型の割れが発生することもあった。この歪み修正用真空炉の問題点をもとに、今回のTP可変歪み修正装置を開発する。

(1) 仕様

TP可変歪み修正装置の主な諸元を、表2. 5に示す。

本装置はアタゴシステム株式会社(長野県岡谷市)により製作され、岡谷熱処理工業に設置された。その後、稼働試験を行い、正常動作することを確認した。今回の製作では、先に基本部を先に製作し、その基本部で歪み処理の実験を行い、装置の改良を行った。その後に装置全体の製作を実施することで、完成度の高い装置を作ることができた。

本装置の概略図を、図2. 9に示す。図の(a)は、基本部分の概略図である。図の(b)は、装置全体である。

(2) 概観

本装置の外観を、図2. 9に示す、(a)が正面であり、(b)が左斜めからの側面である。図の(c)は、装置を駆動するための油圧ポンプである。1 台の油圧ポンプで、装置全体の油圧を供給している。

2-2-2 TP 可変歪み修正装置を用いた温度・加圧力条件の検証

(実施計画項目 ②-2)

開発したTP可変歪み修正装置を用いて、油冷鋼製の金型の歪み修正を行い、最適な修正温度、修正圧力を明らかにする。

(1) 実験方法

油冷却により焼入れ処理されたSK鋼およびSKS鋼製の金型を、TP可変歪み修正装置で歪み修正する。歪み修正処理のパラメータ(歪み修正の温度、歪み修正の加圧力など)を変化させて実施する。実験金型の鋼材としてはSK鋼とSKS3鋼の2種類とし、サイズはA3サイズとした。

(2) 実験結果と考察

歪み修正の実験結果を図2. 10および図2. 11に示す。

図2. 10は、焼入れ処理後の歪み修正前の歪み量と、歪み修正後の歪み量の変化を示したものである。図の(a)は、SK鋼についてのものであり、図の(b)はSKS鋼についてのものである。横軸は焼入れ処理後の歪み修正処理前の状態と修正処理後の状態とであり、縦軸は歪み量である。修正時のパラメータにより色分けしている。修正処理前の歪みが大きくても、歪み修正処理で0. 1mm以下に下がっているのがわかる。

この図では、歪み修正後の歪み量が小さすぎて良くわからないので、修正後の歪み量だけをプロットしてみたのが、図2. 11である。横軸は歪み修正時のパラメータである。縦軸は歪み量である。金型の鋼種で色分けしている。0. 03mmレベルに達しているのがわかる。

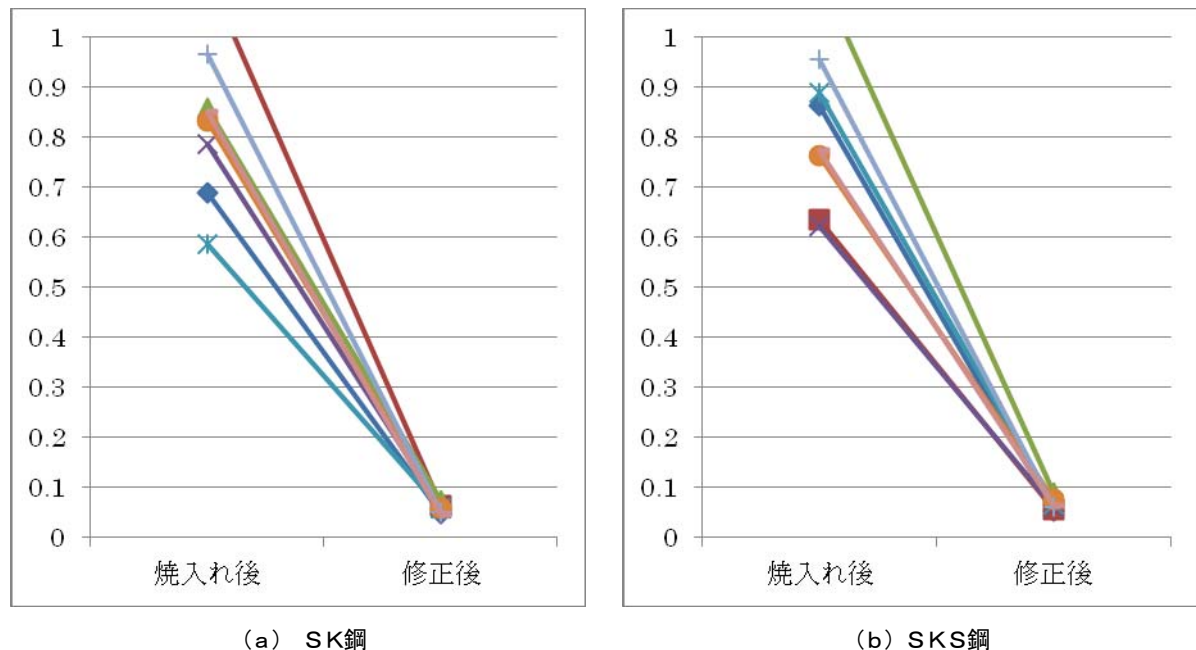


図2.10 焼入れ後の歪みと歪み修正後の歪みの変化

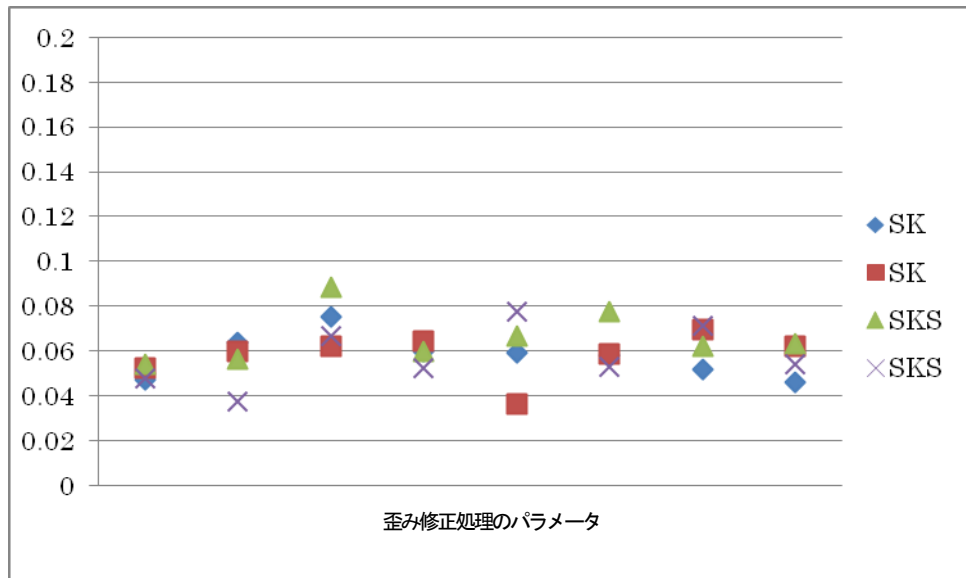


図2.11 歪み修正後の歪みの様子

(3) 熱処理時間の短縮について

TP可変歪み修正装置を使った熱処理における、処理時間について検証する。図2.12に熱処理における処理時間を比較したものを示す。

今回開発したTP可変歪み修正装置を用いた熱処理方法では、従来の熱処理加工に比べて、大幅に処理時間が減少している。焼入れ処理については、油冷却によるものであり、これについては処理時間に変化が無い。しかし焼入れ処理後の、歪み修正処理、焼戻し処理、焼戻し処理での冷却などで、大きく時間短縮が図られている。その比率は従来の約46%と、半分以下になっている。

熱処理における処理時間は実務に最も影響のある部分であり、処理時間を半分にすることは、納期の短縮、熱処理加工コストの低減という非常に大きなプラスを生み出す。

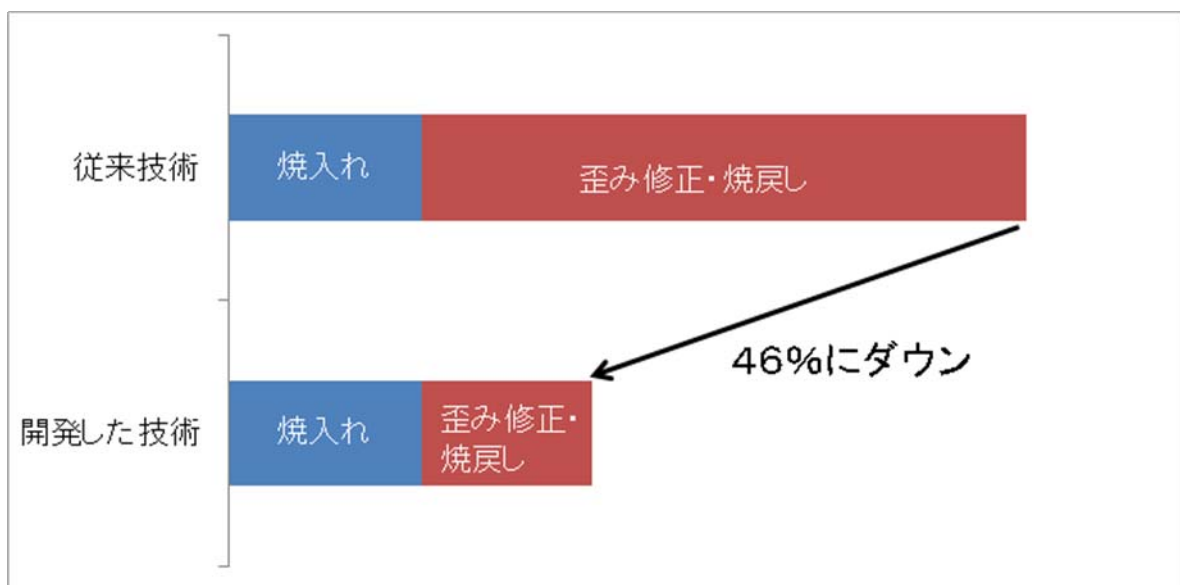


図2.12 熱処理時間の比較

2-3 シミュレーション技術を用いた金型の熱処理における挙動把握¹⁰⁾

(実施計画項目 ③)

ここでは、弾性解析、弾塑性解析、粘弾性解析の3種類のモデルを用いて、シミュレーションを行い、金型の熱処理の最終工程である歪み修正処理(焼戻し処理)の挙動を計算した。弾性解析については、歪み修正の際に金型に加わる力の解析を行っている。弾塑性解析と粘弾性解析では、歪み修正処理後の歪みがどうなるかについて、解析を行っている。

(1) 弾性解析モデルによるシミュレーション

弾性解析モデルを使って、加圧状態を解析した結果が、図2. 13と図2. 14である。図2. 13は、加圧の条件を変えて金型のZ方向の変位を計算したものであり、図2. 14は加圧の条件を変えて金型に加わる応力を計算したものである。それぞれにおいて、修正パラメータを変化させた場合のシミュレーション結果である。Z方向の変位については、修正のパラメータによりかなり違いがあることがわかる。

(2) 弾塑性解析モデルによるシミュレーション

次に弾塑性解析モデルによる、金型の変形の様子のシミュレーションを、図2. 15に示す。加圧の条件を変えて金型の変形を計算したものである。加圧する条件により、金型の変形の形が大きく異なっている。次に、加圧の条件を変えて、負荷状態における応力の分布を計算したものを図2. 16に示す。この結果においても、加圧の条件により応力に差が出ている。

(3) 粘弾性解析モデルによるシミュレーション

粘弾性解析モデルを用いたシミュレーションであるが、これは粘性も考慮に入れた解析であり、歪みの修正、つまり金型の形状の安定的な変形も解析できると考えられる。しかし、今回のシミュレーションでは実際の歪み修正とは異なる結果となってしまう。

シミュレーションで用いている物性データは、文献等から集めているが、温度領域などが異なっており、精度に問題があるものと思われる。

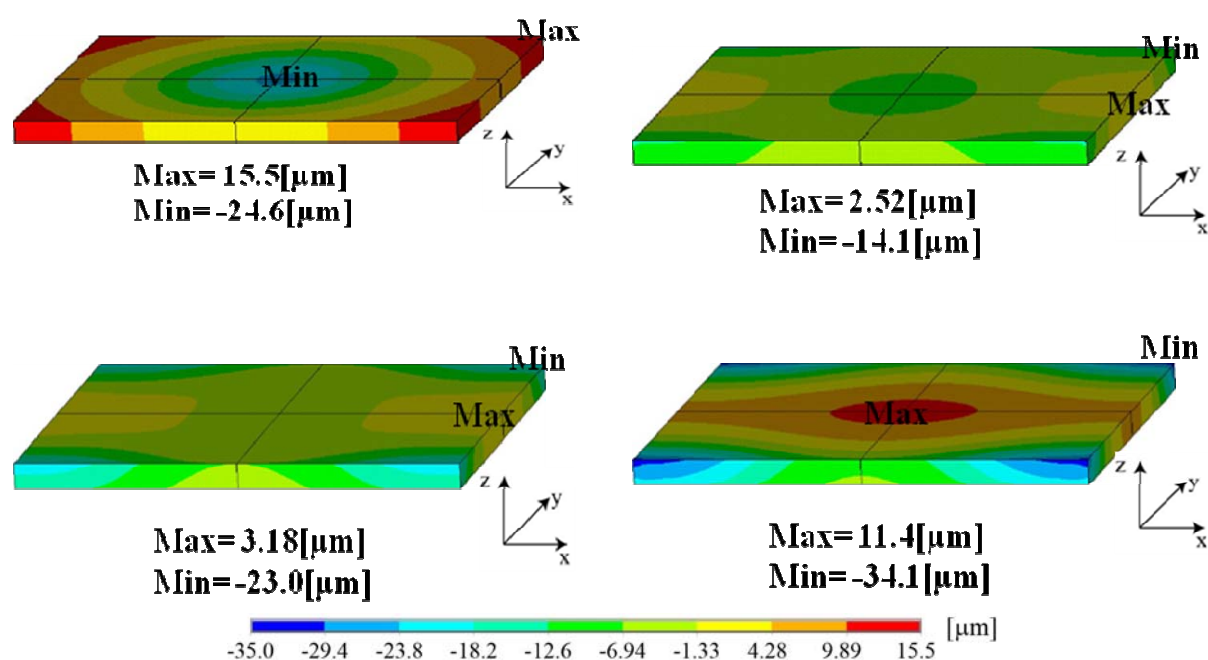


図 2.13 弾性解析によるZ方向変位のシミュレーション結果

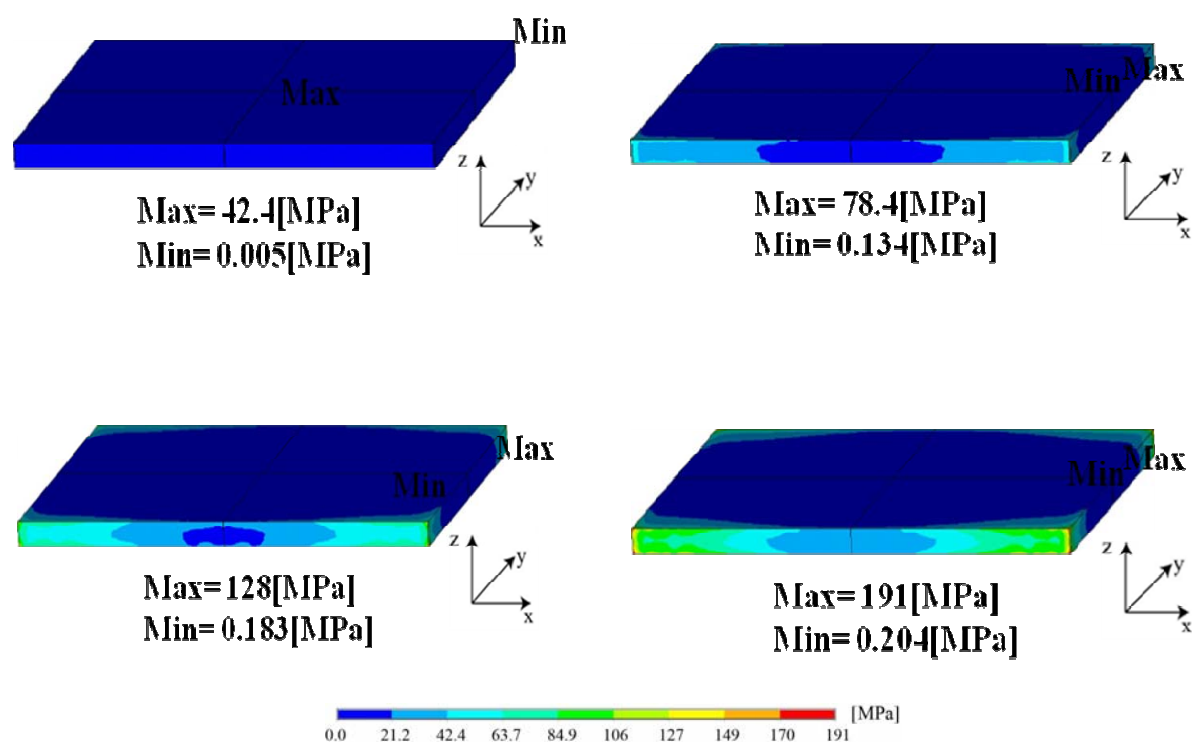


図 2.14 弾性解析による相当応力のシミュレーション結果

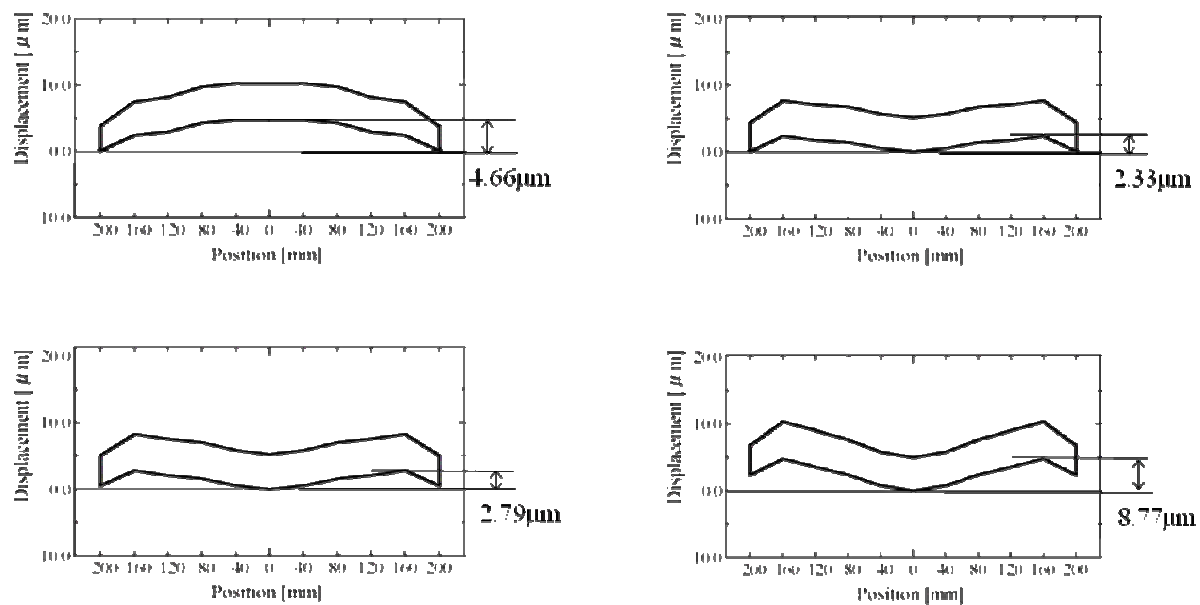


図 2.15 弾塑性解析による変形形状のシミュレーション結果

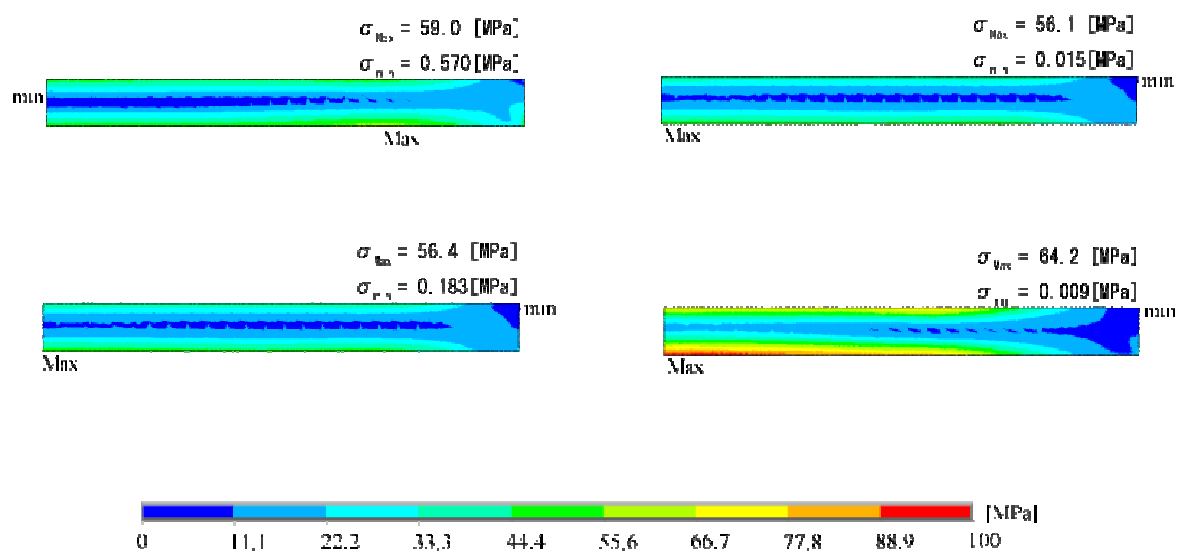


図 2.16 弾塑性解析による応力分布のシミュレーション結果

第3章 全体総括

3-1 研究開発後の課題

本研究開発の最大の目標は熱処理歪みの極小化である。今回の研究開発では、油冷鋼において熱処理後の歪み0.03mmレベルを達成し、また安定的にも0.05mmレベルを実現した。しかし、この歪みの量をさらに小さくしていくことは、熱処理技術の高度化のために目指すべきことである。開発した歪み修正技術は効果が確認できているが、その原理についてはまだ未解明の部分が多い。さらなる歪みの極小化を狙うことで、歪み修正技術の原理の解明につながると思われる。

また、歪みをさらに小さくできれば、プレス金型の製造において仕上げ加工の工程を省くことができる可能性があり、金型製造の技術を根本的に変える可能性がある。またさらに、この歪み修正技術を金属部品製造などの金型製造以外の場面での熱処理にも応用していくことができるとと思われる。

今回開発したTP歪み修正装置の完成度はかなり高いものと思っている。しかし、実際の事業の中で使用するためにはいろいろな改良が必要である。事業の中では量産性が最も重要であり、熱処理の作業工程全体の中においてより効率的であることが必要である。さらには、歪み修正作業の自動化をも検討する必要がある。現状では、技術者の力量による部分がまだかなりある。歪み修正処理とその結果の計測作業とを連動させ、自動化もしくは半自動化を取り入れていく必要がある。

また、高圧ガスによる焼入れ処理の実現や、粘弾性モデルを用いたシミュレーションについては、満足できる結果が得られていない。これらについても、研究開発を継続させる必要があると思われる。これらを実施するためには、研究員、設備や資金が必要となる。また、本歪み修正技術を使った熱処理加工の事業化も進めなくてはならない。今後の事業計画を考えつつ、注力する部分を決めて、すすめていきたいと思う。

3-2 研究開発後の事業化展開

本研究開発による金型の熱処理における歪み修正技術の事業化については、大きく二つの方向がある。ひとつは熱処理加工技術の提供である。もうひとつは、歪み修正装置の提供である。

研究開発のメンバーである岡谷熱処理工業株式会社では、空冷鋼に対する極小歪み熱処理加工を、「©syori」という名前をつけて提供している。今回の油冷鋼に対する熱処理の歪み修正技術は、この現在の「©syori」の対象範囲を拡張させるものである。「©syori」は、空冷鋼の金型を対象とした熱処理で、その歪みの小ささから、金型製造企業から高く評価されている。ここに、今回開発した歪み修正技術を加えることで、空冷鋼および油冷鋼の金型に対する熱処理加工サービスとして提供することができる。

ただし、熱処理加工を正式サービスとして提供するためには、その量産性や信頼性について準備をしていく必要がある。今後、これらの作業に注力していく予定である。

歪み修正装置の提供については、まだ課題がある。修正装置を外部に出すためには、操作が容易でなければならない。この面からも歪み修正装置の自動化、あるいは半自動化の機能の開発が必要と思われる。

本歪み修正技術により、日本のものづくりのさらなる発展に寄与できれば、と考えている。

参考文献

- 1) (社) 日本熱処理技術協会, 日本金属熱処理工業会 編: “熱処理技術入門”, (株) 大河出版 (2004).
- 2) (社) 日本熱処理技術協会編: “入門・金属材料の組織と性質”, (株) 大河出版 (2004).
- 3) (社) 日本熱処理技術協会編: “熱処理用語辞典”, 日刊工業新聞社 (2002).
- 4) 本間昭夫: “理工系基礎 力学”, 学術図書出版社 (1999).
- 5) (社) 日本鉄鋼協会編: “鋼の熱処理”, 丸善株式会社 (1969).
- 6) 川口誠司, 天野宏地: “熱処理にまつわる問題点・トラブルとその防止策”, NACHI-BUSINESS news, (2005), Vol. 6D1, pp. 1-7.
- 7) 高橋 昇, 浅田千秋, 湯川夏夫: “金属材料学 (第3版)”, 森北出版, pp. 174-179 (1998)
- 8) 佐藤知雄 編: “鉄鋼の顕微鏡写真と解説”, 丸善, pp. 152-153 (1965).
- 9) 日本金属学会編: “金属組織写真集 鉄鋼材料編”, 丸善, pp. 36-38 (1981).
- 10) 日本金属学会編: “金属データブック”, 丸善, p. 249 (1984).