

特別研究

1 金属加工技術のハイテク化推進事業

(1) 熱処理における形状変形の予測

機械部 江 藤 博 明
 " 後 藤 幸 臣

1 はじめに

最近では、大分県内の企業も多種多様な高合金鋼を使用して、金型をはじめ治工具等制作しているが、需要者よりの品質に対する要求はますます厳しさを増している。高合金鋼を能率よく駆使するには、使用目的に合った熱処理が施されたか否かがその成否を左右する。

現在、最もポピュラーな高合金鋼の高機能化技術は、熱処理であるが、高温加熱・急速冷却に伴う硬化とともに、形状変形と体積変化が同時に起こる。

これらの寸法変化は、金型や治工具等の製作上大きな障害となる。

この熱処理上不可避の課題である寸法変化に、ある一定の方向性があることに着目し、変態応力・熱応力・材料の異方性の3点からこれを究明した。

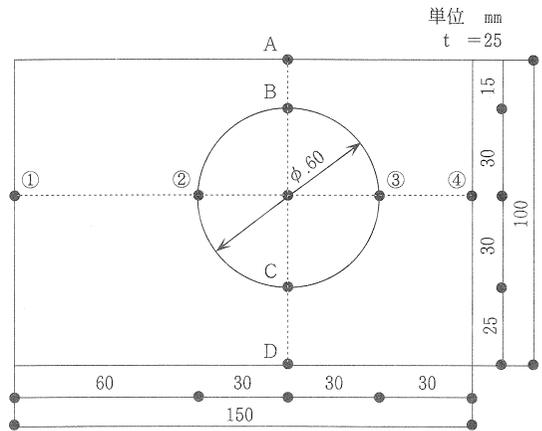


図1 体積変化の傾向を把握するため、要因を絞った試験片

2 実験方法

完全焼鈍→硬さ測定→試験片加工→三次元形状測定→真空熱処理（高合金鋼1050℃、低合金鋼850℃）→体積変化測定（変寸）→球形化の解明→形状変形制御のプロセスで進めた。

測定にあたっては、20℃恒温下に72時間以上保持し、三次元形状測定機で行った。

試験片は、図1のように孔の位置が一定条件下になるよう要因を絞って、初年度は二次元的に捉えた。

図2は、円柱型試験片で球形化現象を究明したものである。

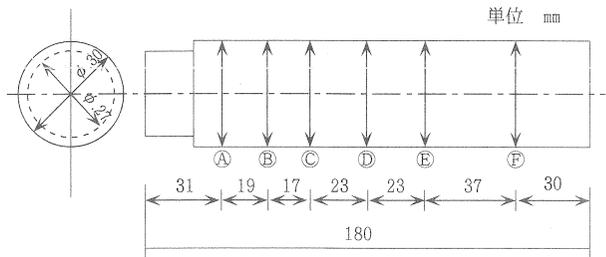


図2 球形化現象測定位置とその試験片

なお、材料どりの方向としては、金型の作業応力と素材の圧延方向が直角となる必要があるが、県内の金型メーカーの一般的なとりかたに準じている。

供試材の主要成分は表1のとおりである。

表1 供試材の主要成分

鋼種名	成分 (%)							総量	
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W		
SKD61	0.36	—	0.90	5.21	1.26	1.15	—	8.88	
SUS440A	0.67	0.89	0.84	17.82	—	—	—	20.22	
SKD11	1.38	0.31	—	11.80	0.87	0.39	—	14.75	
SKH51	0.86	—	—	—	5.18	1.97	5.96	13.97	
SKS3	0.89	1.02	—	0.72	—	—	0.60	3.23	
SK3	1.01	0.97	—	—	—	—	—	1.98	
SNM436	0.44	—	—	0.70	Ni	1.63	—	—	2.77

5%以下低合金鋼、10%以上高合金鋼

3 実験結果及び考察

金型等に使用される高合金鋼の最も有効な高機能化は、焼入れである。

焼入れは、高温に加熱した合金鋼を所定の速度で冷却する処理で、その目的は鋼を硬化（耐磨耗性付与）させることである。

本実験では、焼入れ硬化に伴う体積変化（変寸）と形状変形（曲がり・歪）、更に、球形化（部分球形化も含む）について究明した。

焼もどしは、変態点以下の温度で処理した。この焼もどし処理によって、不安定な焼入れ状態の組織を安定化し、置き狂いを防止し、変形の測定を行った。

3.1 金型に発生する体積変化（変寸）の傾向の把握

一般的な金型を、図1のように孔が両端面から2:1の比率になるような試験片とし、限られた要因に絞り込んで焼入れを行った。

処理試験材は、代表的な金型用高合金鋼 SKD 11 である。板厚は25mmに統一。

図3は、焼入れによる変寸量とその傾向である。

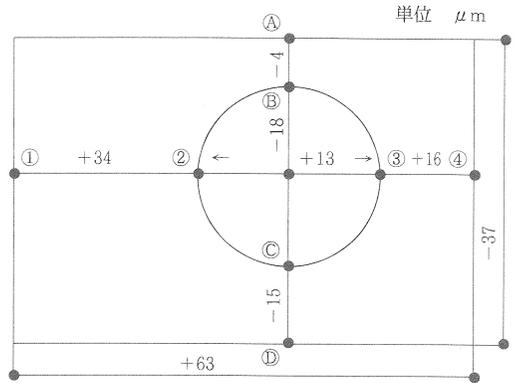


図3 熱処理後の体積変化（変寸）の一例

長手方向に63 μm/150mm膨脹し、縦方向に37 μm/100mm収縮している。膨脹=1.1収縮とほぼ同比率の変寸である。

長手方向に起こる膨脹（①②・③④間）は、変寸が2倍、元の長さも2倍であるので、③④=2/2 ①②長さに比例して変寸している。

ところが、AB間のように端面まで15mmと他の部分に比べて薄肉部があると、厚肉部CD間に比して、収縮比率が薄い方は15mmで4 μm、厚い方は25mmで15 μmとなり、約1/2となる。この原因は、一番薄い部分が冷却により先に縮み、全体が冷えてくると引っ張られて広がる反転現象である。AB: 4/15 = 1/2 · 15/25CD が成り立つ。

膨脹収縮に限らず熱処理変形は、変態応力+熱応力で複合変形となるので、全く等量とはならないが、限りなくこの比率に近づく傾向がある。

更に、要因を絞り込んで、無孔にし、長方形の単純な板状試験片（縦横の比率1.5倍）にして、二次元的解析をすると、図4のように、70 μm/100mm収縮し、102 μm/150mmの膨脹を起こす。孔の変寸比率は母材部（図3）の1/2であるので、その分加算され、全体の変寸は60mmの孔があった場合の2倍となる。AB = 1.5/1.5①②で比例している。

孔の有無にかかわらず変寸の傾向は全く同じ方向性を示した。

このことから、長手方向には、100mmにつき70 μm膨脹分を見込んでマイナスの加工代をとり、縦方向には、逆に同量のプラスの加工代を付ける。必然的に孔有りでは、その半分の加工代をとれば、高

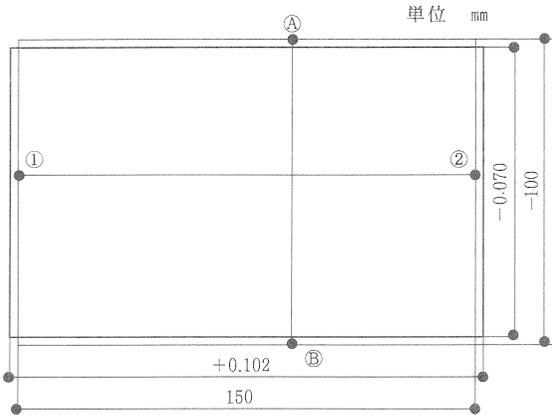


図4 長方形の板の体積変化(変寸)の一例
(太線のように変寸、測定はAB・12間)

機能化後に目的の型の寸法となる。

孔の形状の変化は、型の長手方向に広がり、縦方向に収縮する。つまりは楕円形に変寸し、その量は母材部の約1/2である。100mmにつき30μm~35μm縦方向に楕円形に加工するか、逆の取り代をつければ母材部と同様のことがいえる。

3.2 円柱型(シャフト等)の球形化

金型用高合金鋼SKD11、SKD61、SUS440A等、熱処理によって高機能化する代表的な鋼種で図2のような試験片を作り、種々の焼入れを行い、その変化を追求した。

その結果、急速冷却に起因する体積変化(変寸)に一定の方向性(球形化)があることを見出した。

図5は、焼入れに伴う変寸の推移を示したものである。SKD61が18μmから中央23μmと大きく、SUS440Aが4μm→6μm、SKD11が3μm→7μmと中央に向かって円弧の変寸となる。

JIS規格に則った焼入れ・焼もどし後の直径は、中央に向かって凸型になる球形化現象が3鋼種とも顕著に表れている。

過熱焼入れや繰り返し焼入れで変寸を増幅させると、直径の膨脹は、中央部でそれぞれMax 50μm・35μm、21μmと一層顕著に球形化プラス要因となる。

図6は、長さの変寸の推移である。SKD61・SUS440Aは、180mmにつき100μm・73μmと収縮する。

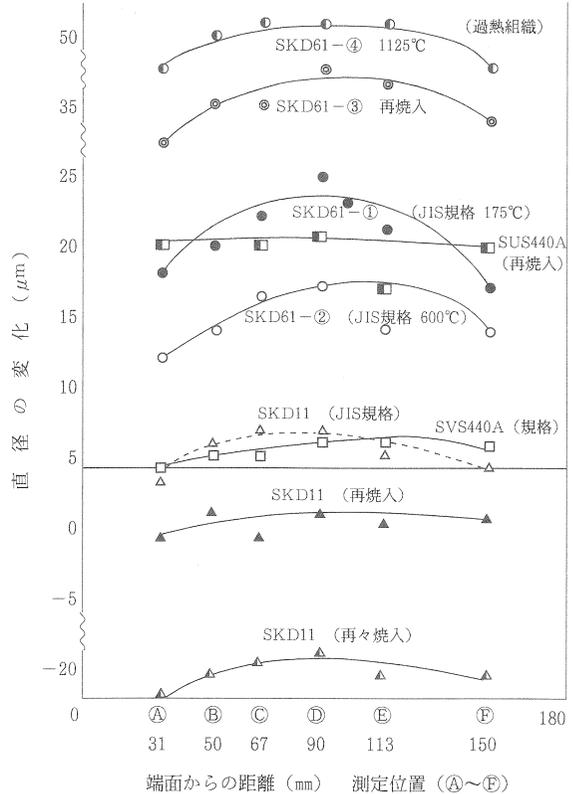


図5 繰り返し焼入れに伴う変化量の推移

$$(D-D')/D \times 100 + (L-L')/L \times 100 = \text{球形化率}$$

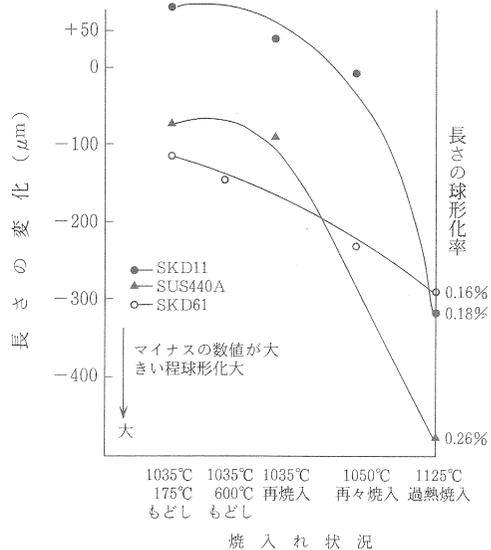


図6 繰り返し焼入れに伴う長さの推移

SKD11は膨脹傾向を示すが、繰り返し焼入れに伴い急速に収縮する。過熱及び繰り返し焼入れによって、変寸を増幅させるとSKD61が293 μ m、SKD11: 317 μ m、SUS440A: 476 μ mと急速に収縮する。

直径が膨脹、長さが収縮する“ずんぐりむっくり”の球形化となる。これらの変寸から次式を作り、
 $(D - D') / D \times 100 + (L - L') / L \times 100 = \text{球形化率}$

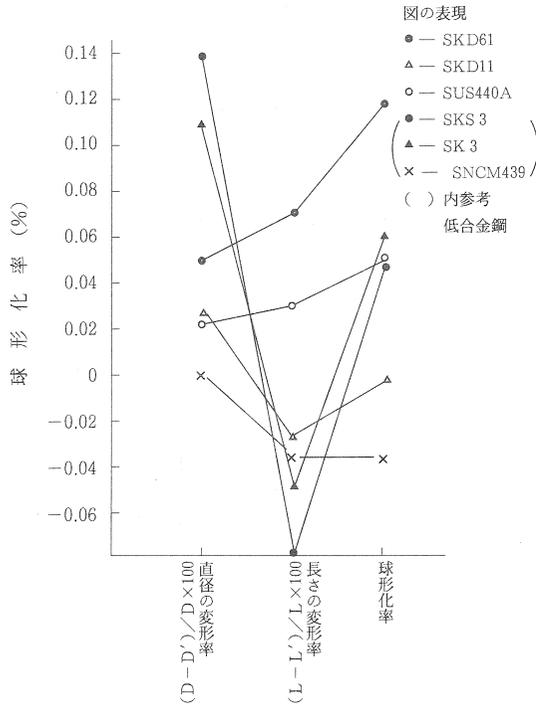


図7 各種合金鋼の球形化動向

これを基に球形化率を計算すると図7のようになる。高合金鋼は炭化物による収縮傾向の球形化 (Max 0.12%)、低合金鋼はマルテンサイト状態で膨脹傾向の球形化 (Max 0.06%) を起こすことを究明した。

3.3 高温加熱に起因する形状変形の制御について

従来の熱処理では、炉内圧があるので対流伝熱が起こるが、真空熱処理の場合、輻射熱のみで等分に加熱することができる。この点に着目して、昇温速度のヒートプログラムパターンを種々変えることによって、歪や曲がりの形状変形を大幅に減少させる

ことができた。

この現象解明に用いた試験片は、球形化を追求した試験片と同じ試験片で、図2に示すような直径30mm長さ180mmの円柱型である。シャープコーナーがあり細長いので形状変形は起こり易い形である。

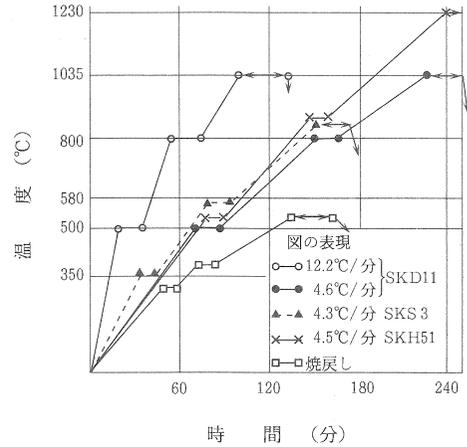


図8 真空焼入れのヒートプログラムパターンの一例

図8は、そのヒートプログラムパターンの一例である。この制御は鋼種を問わず歪や曲がりに効率的であり、特に、金型用高合金鋼 (SKD11・61) には絶対的な効果を発揮した。図9のようにSKD11は12.2 $^{\circ}$ C/分で83 μ mの曲がりが4.6 $^{\circ}$ C/分では3.5 μ m、SKD61では12.2 $^{\circ}$ C/分で67 μ mが4.6 $^{\circ}$ C/分で32 μ mと好結果を得た。但し、SKD61は焼もどし温度が600 $^{\circ}$ Cと高い。このことによって耐衝撃性、熱軟化抵抗を増しているが、500 $^{\circ}$ C以上では急激に膨脹するので、形状変形に影響が出て曲がりが大きくなっている。

低合金油冷鋼 (SKS 3・SK 3) は、700 μ mが320 μ m、375 μ mが88 μ mまで低下し、昇温制御効果はあるが、油冷なので冷却速度が早く、冷却過程に形状変形が委ねられることを示し、100~300 μ m Maxの曲がりを見込まなければならない。

しかし、安価で加工性も良く、結構焼入れ性も良いので、県下の企業でも用途によってはよく使われている。

2年度以降の課題としては、図10のように薄肉部

がより鮮明になるように、孔の位置を移動させて、形状変形の動向を追求する必要がある。

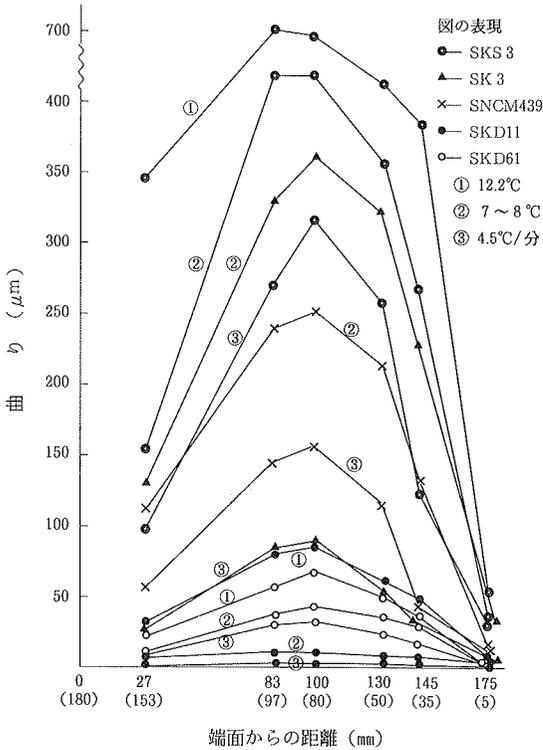


図9 各種合金鋼の昇温速度による変形の推移

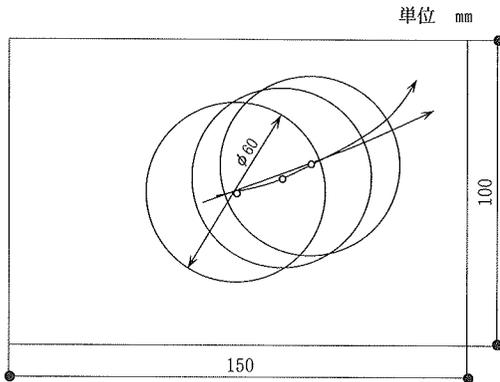


図10 孔の位置の軌跡による形状変形の究明

4 おわりに

精密金型等に使用される合金鋼は、熱処理によって高機能化されるが、高温加熱・急速冷却による硬

化とともに、形状変形が起こる。

この金型等の製作上大きな障害となる変形を次のように究明した。

4.1 金型に起こる体積変化(変寸)の傾向把握

長方形の金型では、同量の変寸比率(70μm/100mm)で、長手方向に膨脹、縦方向に収縮した。型に孔がある場合、孔の変寸比率は母材部の1/2、同傾向の変寸方向を示し、楕円形となる。

事前加工代をこの結果と逆方向にとれば、高機能化後に目的の型の寸法となる。

4.2 円柱型(シャフト等)は球形化

直径が膨脹、長さが収縮する“ずんぐりむっくり”の球形化となる。

$$\text{変形率} = \text{変形量} \div \text{元の長さ} \times 100$$

$$\text{球形化率} = \text{直径の変形率} + \text{長さの変形率}$$

上式から、炭化物で硬化する高合金鋼は、収縮型球形化でMax0.12%、マルテンサイト変態で硬化する低合金鋼は、膨脹型球形化で0.06%となった。

“鉄はすべからく熱を加えると丸くなる”とまでは断定しきれないが、すべからく熱応力はそういう傾向をもっていることを把握できた。

4.3 高温加熱に起因する変形の抑制

歪や曲がりの形状変形は、変態点近傍を段階式加熱、昇温速度を4.6°C/分以下に制御すれば、代表的な金型用合金鋼のSKD11が83μm→3μm、SKD61が67μm→32μmまで減少可能である。

ただし、低合金鋼(SKS・SK等)のように急冷(油又は水冷)で硬化するものは、変形が冷却過程に委ねられるので、一定量(320μm→88μm)までは可能だが、それ以下は昇温制御では不可能である。

本実験に使用した真空熱処理炉及び三次元形状測定機は日本自転車振興会から、競輪収益の一部である機械工業振興資金の補助を受けて設置したものである。

(九州熱処理技術研究会研究発表)

(九州産業技術誌一部掲載)