

# 真空熱処理による合金鋼の 物理的性質 (第3報)

— 体積変化と形状変形 —

機械部金属科 江 藤 博 明  
電子部電子科 藤 井 謙二郎

## 1. はじめに

精密金型や刃物工具に使用される合金鋼は、熱処理の方法によってその特性を広い範囲に変化させることができ、いろいろな要求に適合させることができる。

この熱処理の中でも、焼入れが最も重要な処理であるが、急冷硬化に伴う熱ひずみと体積変化が同時に起こる。

加熱に伴う熱膨張は、冷却とともに常温で元に戻るが、相変態による体積変化が大きな問題となる。

本実験でも、低合金鋼は、 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 変態で体積膨張を生じ、高合金鋼は、 $\gamma \rightarrow$ 炭化物 ( $\text{Cr}_4\text{C}$ ) の生成で逆に体積収縮を起こした。

この体積変化と実際の金型等の加工形状による変形等、ひずみと寸法変化の関連について究明した。

## 2. 供試材

合金鋼には万能的な鋼種はなく、ある性質を強く要求すれば、他の性質は劣ることになるのが普通である。

この点を考慮して、本実験では、現在使用されている鋼種を広範囲に網羅した。

SKS 3, SK 3, SUJ 2, 等の低合金鋼, SUS 440 A, SKD 11, 61, SKH 51 等の高合金鋼である。

これらの供試材は、加工前にそれぞれ高合金鋼は850°Cで、低合金鋼は780°Cで徐冷して完全焼なましを行った。

各材料の主要化学成分は表1のとおりである。

## 3. 実験方法

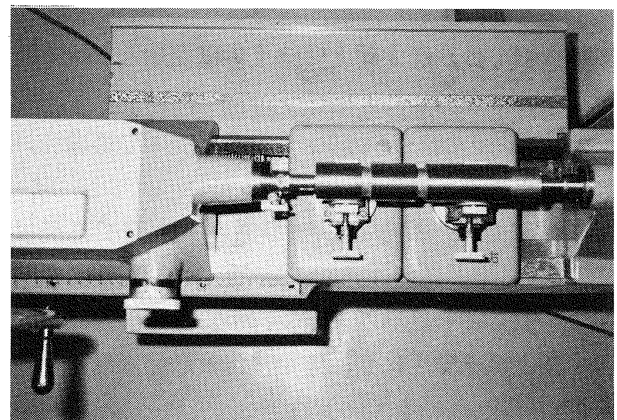
第2報までの形状変形 (ひずみ) と硬化深度を重

表1：供試材の主要成分 (%)

No.	材 料 名	C	Mn	Cr	Mo	W	V
0	SUS440A	0.67	0.89	17.82	—	—	—
5	S U J 2	1.06	0.34	1.47	—	—	—
A	S K D 61	0.36	Si 0.90	4.68	—	—	0.63
B	S K H 51	0.86	—	—	5.18	5.96	1.96
7	SNCM439	0.44	—	0.70	Ni 1.63	—	—
1	S K S 3	0.89	1.01	0.72	—	0.60	—
2	S K 3	1.01	0.96	—	—	—	—
3	S K D 11	1.38	—	11.80	0.87	—	0.21

点とした内容から、今回はマルテンサイト変態および炭化物生成時の体積変化を加味して、形状変形との関連をしらべた。

体積変化については写真1のように測長器を使用して、0.5  $\mu\text{m}$  まで精密測定を行った。



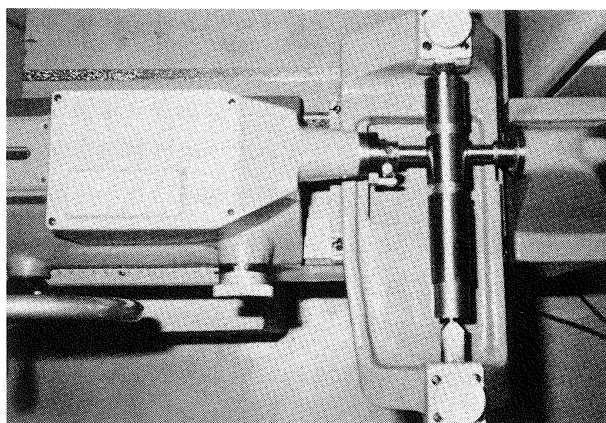


写真1：体積変化測定、上：長さ、下：直径

ひずみについては、前報までと同様電子マイクロメーターで測定した。

熱処理後の長さ、直径、硬さ、ひずみの測定位置は図1のとおりである。

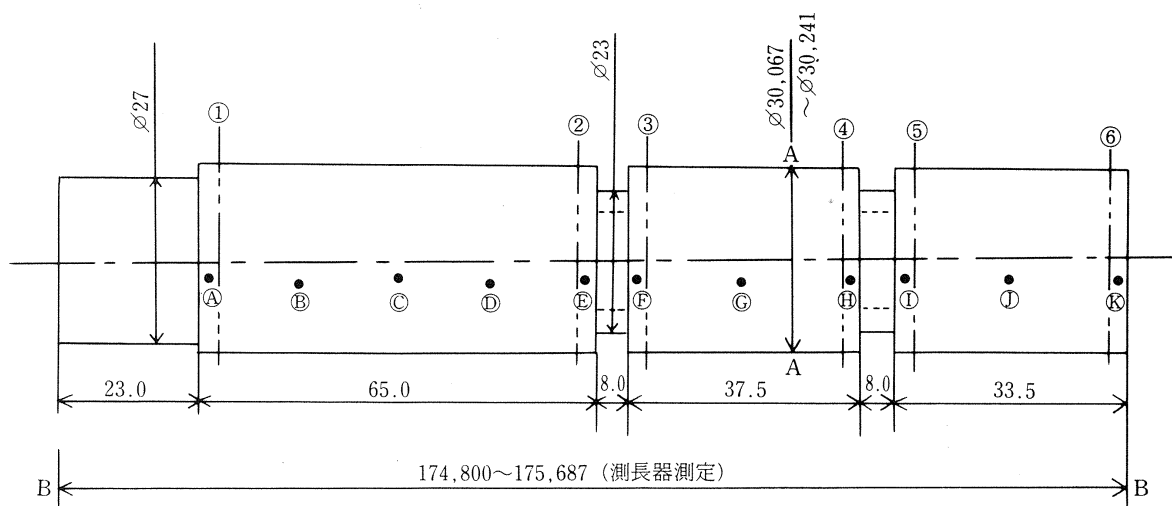


図1：真空焼入試験片と体積変化・硬さ・ひずみ測定位置  
(図の表現 A↔A：直径，B↔B長さ，①～⑥ひずみ，Ⓐ～Ⓚ硬さ)

#### 4. 実験結果および考察

合金鋼の焼入れは、高温に加熱した鋼を所定の速度で冷却する処理で、その目的は鋼を硬化することである。

本実験では、焼入硬化に伴う体積変化と形状の変形について究明した。

焼入れ時の加熱・冷却はすべて真空中で処理し、1020°Cガス冷と850°C油冷で行った。

焼もどしは、変態点以下の温度（冷間工具鋼は180°C，熱間工具鋼は560～600°C）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金属組織を安定化し、体積変化と形状変形の測定を行った。

前報では、形状の変形（ひずみ）を中心に考えてきたが、今回は特に体積膨脹あるいは収縮による寸

法の変化を主体とした。

図2は本実験のフローチャートである。

4-1) 直径と長さの変化（体積膨脹・収縮）について

焼入れによる熱ひずみはもちろん、これとは別に、県内の企業からしばしば熱処理後の寸法変化について相談を受けていた。その寸法変化の実際例を図3、写真2、図4に示した。熱処理後収縮をおこしたケースである。

これまでマルテンサイト変態による油冷鋼の膨脹は、熱膨脹計でCCT曲線を作成した時に論じてきたが、収縮については通常考えられなかった。図3のHPM 38は13%Crベースで含MoのSKD 11相当の鋼である。この鋼種は写真3のような硬いCr炭化物やMo炭化物を形成し、焼入れは1025°Cの高

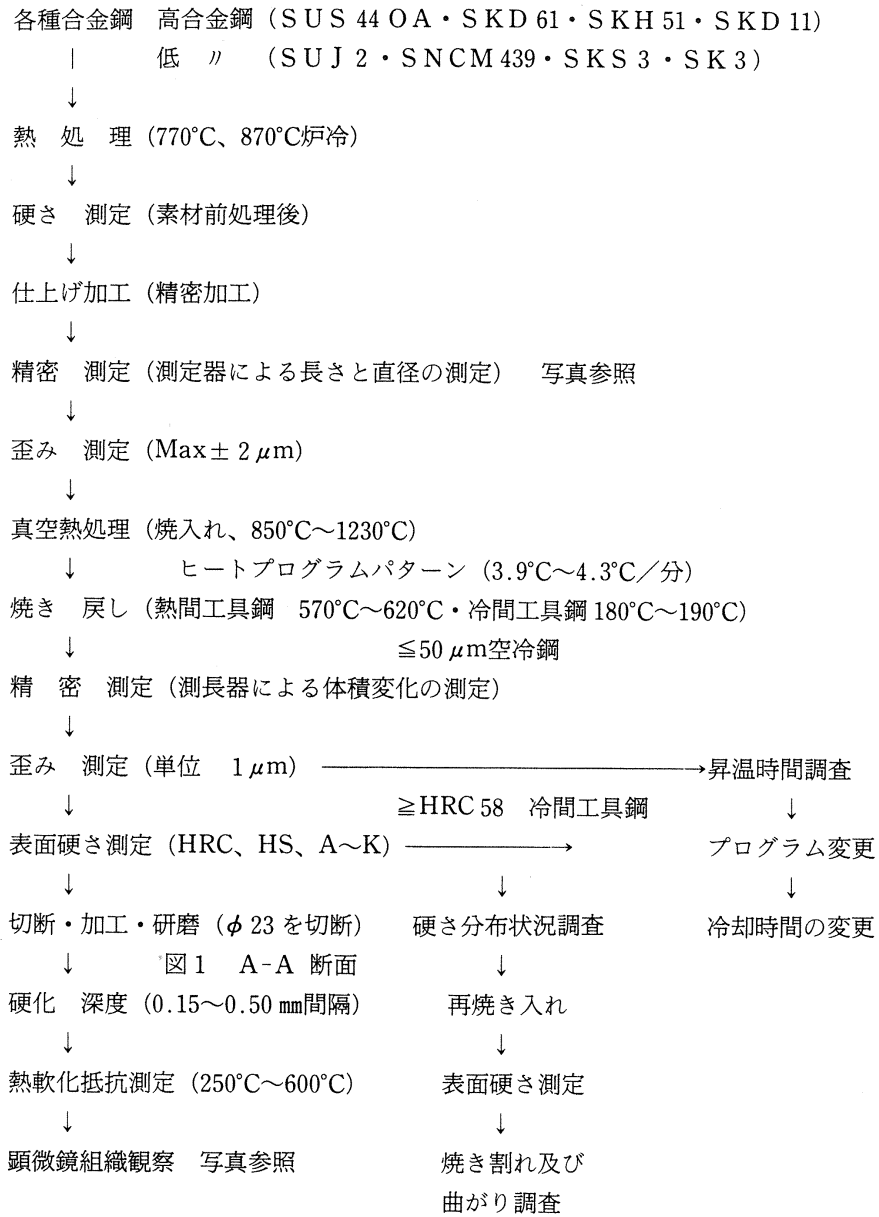


図2：本実験のフローチャート

熱処理後寸法が小さくなった例

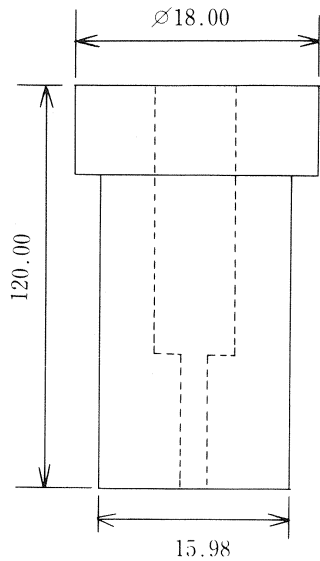


図3：注射針の金型（兼用針基）

熱処理後の長さや直径の変化は次のとおり

$\varnothing 18.00 \rightarrow \varnothing 17.99$

$\varnothing 15.98 \rightarrow \varnothing 15.97$

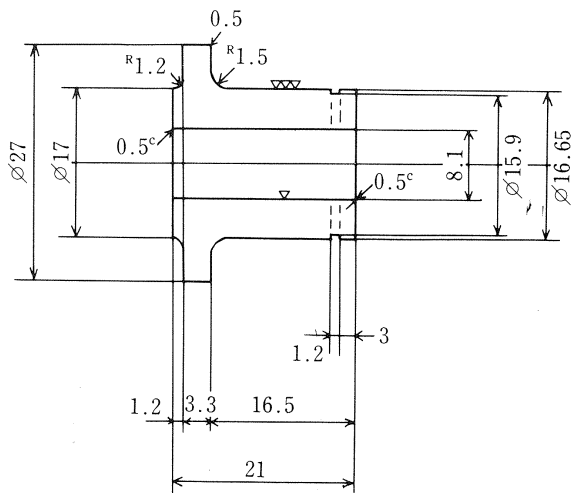


図4：ベアリング受け

21.07mm→21.070mm

21.03mm→21.030mm

21.09mm→21.085mm

$\varnothing 16.65 \rightarrow \varnothing 16.640$

$\varnothing 16.65 \rightarrow \varnothing 16.645$

$\varnothing 16.65 \rightarrow \varnothing 16.645$

合金鋼名：SKD11

硬 さ：HRC64.0

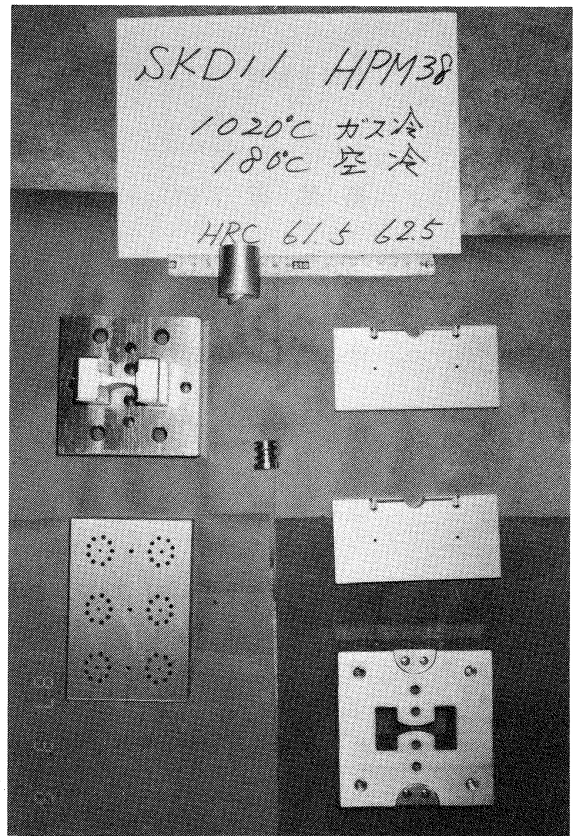


写真2：焼入れ後体積収縮をおこした金型の実際例

120.00mm→119.92mm (0.08mm)

$0.00066\text{mm} / 1\text{mm} = 0666\text{mm} / 1\text{mm}$

合金鋼名：HPM38 (≒SKD11)

13Crベース (含Mo)

硬 さ：HRC61.5

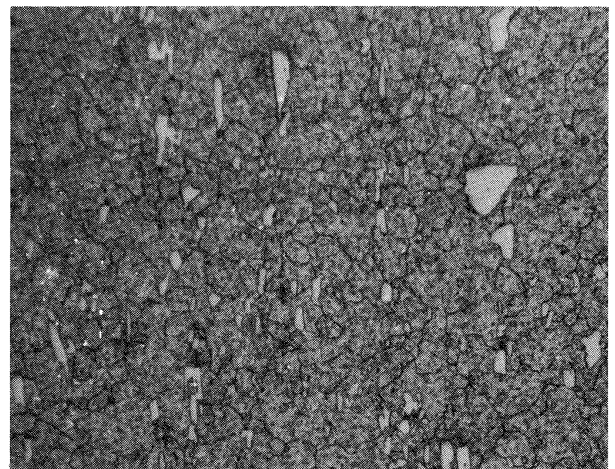


写真3：HPM38種のCr, Mo炭化物  
1025°Cガス冷, 180°C空冷  
HRC62.5

温からのガス冷鋼である。SKD 11 より Cr 量が多く、Ni 量が少ない関係で焼入れ硬化は HRC で 3 ~ 5 低くなっている。

図 3 の兼用針基、図 4 のベアリング受け等、測定は熱処理依頼をしてきた企業が現場で行ったので、測定精度は充分ではないが、18 mm ~ 20 mm の長さのもので 0.010 mm ~ 0.005 mm、6 倍の長さの 120 mm では 119.92 mm と 0.08 mm もの炭化物による収縮をおこした。

この寸法変化が対流のおこらない真空炉内の温度分布に伴う硬さのバラツキではないことは写真 4 のとおりである。

加熱・冷却に伴うこれら合金鋼の長さの変化は、

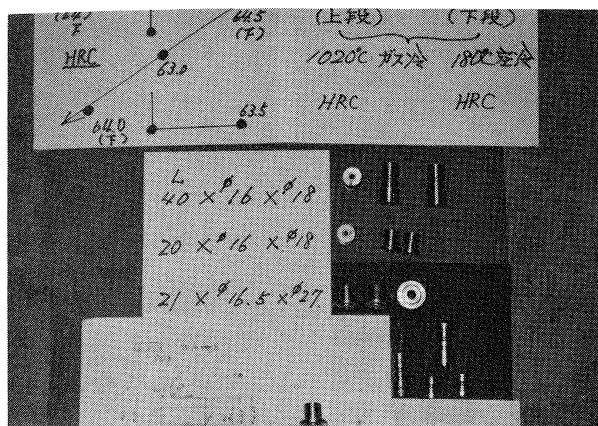


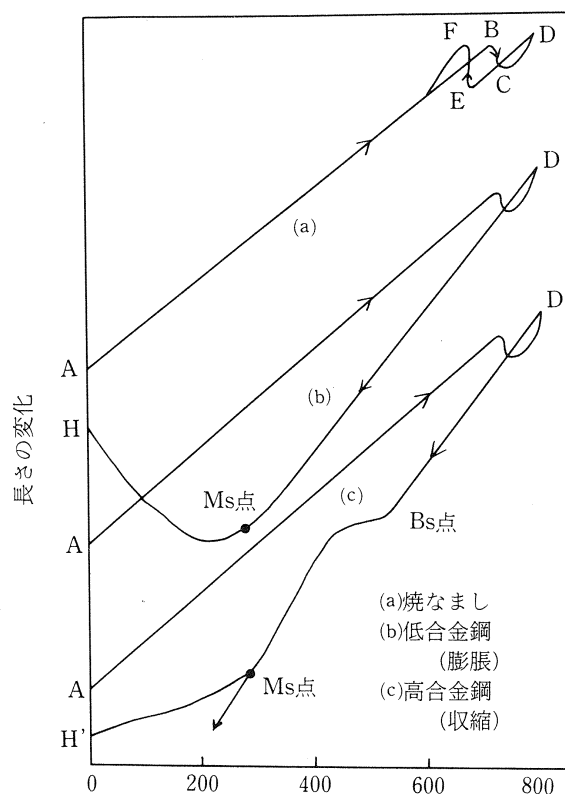
写真 4 : 真空炉内の温度分布からの硬さの動向と実際の焼入物

図 5 のように想定される。

曲線(a)では、合金鋼を常温から加熱すると A から次第に膨脹し、 $A_1$  変態点では BC なる収縮がおこり、オーステナイトになる。さらに加熱すれば CD と膨脹する。オーステナイトの状態から炉中で徐々に冷却すると再び  $A_1$  変態点で EF なる膨脹をおこし、パーライトとなり、以後温度の低下とともに常温まで収縮し加熱前の A の状態にもどる。この熱処理が本実験鋼に共通に行っている焼なましである。

曲線(b)および(c)はオーステナイト領域から、油冷およびガス冷を行った。この b c 曲線の加熱・冷却に相当する熱処理が焼入れである。

曲線(b)では、 $182^{\circ}\text{C}$  でマルテンサイト変態をおこし、AH に相当する長さだけ加熱開始前より膨脹する。



SKS3 (b 曲線)

$$\text{Ms点} = 550^{\circ}\text{C} - (350^{\circ}\text{C} \times 0.89) - (40^{\circ}\text{C} \times 1.01) - (20^{\circ}\text{C} \times 0.72) - (5^{\circ}\text{C} \times 0.60) \approx 182^{\circ}\text{C}$$

図 5 : 合金鋼の加熱・冷却に伴う長さの変化

曲線(c)は逆に炭化物の生成により AH' なる収縮をおこす。

この点に着目し、図 1 のように精密加工した試験片を作り、マルテンサイト変態と炭化物生成で発生する体積変化について究明した。

表 2 は、鋼種ごとの長さ、直径の変化を測定したものである。

この結果から、油冷した低合金鋼 (b 曲線) の膨脹は、SKS 3 がひずみと同様顕著で、 $\phi 30$  で 0.041 mm と大きく、SK 3 が 0.032 mm, SUJ 2 は 0.005 mm と膨脹の少ない結果となった。

伸びは、175 mm で 0.10 mm ~ 0.16 mm の範囲で変化した。これを単位当りでみると、直径は 0.041 mm/30 mm で 0.0013 mm/1 mmMax, 長さは 0.165 mm/175 mm, 0.0009 mm/1 mmMax である。

ガス冷した高合金鋼 (c 曲線) の収縮は、SKD 11 が  $\phi 30$  で、0.026 mm, SKD 61 は 0.018 mm, 伸びは 175 mm で 0.034 mm ~ 0.043 mm の範囲となり、体積変化は油冷鋼より少なく好結果となっている。

表2：焼入による長さや直径の変化について

単位 mm

	熱処理	長さ	差	直径 (基点)	差	直径 (90)	差	
0	前	175.257	-0.115	30.224	-0.004	30.226	-0.004	-0.004
	後	175.142		30.220		30.220		
1	前	175.522	0.165	30.196	0.045	30.193	0.037	0.041
	後	175.687		30.241		30.230		
2	前	174.695	0.105	30.098	0.035	30.100	0.030	0.032
	後	174.800		30.133		30.130		
3	前	175.209	-0.034	30.241	-0.025	30.239	-0.028	-0.026
	後	175.175		30.216		30.211		
A	前	175.195	-0.082	30.085	-0.018	30.076	-0.018	-0.018
	後	175.113		30.068		30.058		
5	前	175.518	0.130	30.199	0.006	30.202	0.004	0.005
	後	175.648		30.205		30.206		
大2	前	174.740	0.150	30.0745	0.030	30.076	0.032	0.031
	後	174.890		30.105		30.108		

番号	鋼種	焼入形態	現象
0	SUS 440 A	ガス冷鋼 炭化物形成鋼	収縮
3	SKD 1 1		
A	SKD 6 1		
1	SKS 3	油冷鋼 マルテンサイト形成鋼	膨脹
2	S K 3		
5	SUJ 2		
大2	S K 3		

単位当りでは、0.018 mm~0.026 mm/30 mm(0.0006~0.00086 mm/1 mm), 長さは 0.00019 mm~0.00024 mm/1 mm である。

この体積変化は相変態によるもので、必ず一定量の膨脹・収縮がおこる。ひずみのようにヒートバタンで大幅に向上させるような方法はない。精密金型や刃物工具等を製作する場合、加工時に鋼種による伸縮分を事前に考慮しておくことが重要となる。

現在、実験的に製作している会社もあり、部分的には成功している。幅広い Data の収集を急いでいる。

4-2) 形状変形 (ひずみ) について

今回の実験では、マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS 440 A), 高炭素クロム軸受鋼 (SUJ 2) を新たに追加するとともに、これまでの段差 (φ 30 対 φ

16 → φ 30 対 φ 23) を1/2にして、形状変形がどのような動向を示すかしらべた。

表3, 表4は新規加入の2鋼種のひずみと硬さの分布状況である。

SUS 440 A は, SKD 11 より6%も Cr を多く含んだ17.82%Cr のステンレス鋼で、耐蝕性に優れ、本実験では、焼入れ硬さ HRC 60±0.5 と硬さにムラがなく、焼入れ性の良い鋼種である。形状変形も6 μmMax と好結果を得た。しかし、金型や刃物には、切れ味 (高硬度) で表5のように多少劣るといわざるを得ない。

SUJ 2 は、高炭素で Cr を1.47%含んでいるが、低合金鋼で偏析をおこしやすく、表4のように焼きムラの発生しやすい元素配分といえる。形状変形は、37 μmMax と油冷鋼では SK 3 と並ぶ変形の少ない

表3：高合金鋼（冷間圧延ステンレス鋼）SUS 440 Aの真空熱処理後の物性値

1. ひずみ (μm)

測定位置 (1)				測定位置 (3)				測定位置 (5)			
No.	加工後	焼入後	歪み	No.	加工後	焼入後	歪み	No.	加工後	焼入後	歪み
1	0	0		1	0	0		1	0	0	
2	0	+3	3	2	-1	+4	5	2	0	+2	2
3	0	+3	3	3	+1	+6	5	3	+1	+2	1
4	+1	+4	3	4	+3	+9	6	4	+1	+2	1
5	+2	+4	2	5	+1	+2	1	5	+1	+1	0
6	+3	+3	0	6	-1	-3	2	6	0	-1	1
7	+2	+3	1	7	+2	-3	5	7	0	-3	3
8	+1	-2	3	8	+1	-2	3	8	0	-2	2
測定位置 (2)				測定位置 (4)				測定位置 (6)			
No.	加工後	焼入後	歪み	No.	加工後	焼入後	歪み	No.	加工後	焼入後	歪み
1	0	0		1	0	0		1	0	0	
2	+1	+3	2	2	0	+2	2	2	0	+1	1
3	0	+6	6	3	+1	+5	4	3	+1	+3	2
4	+2	+7	5	4	+3	+6	3	4	+1	+3	2
5	+2	+6	4	5	+2	+4	2	5	+1	+2	1
6	+3	+1	2	6	+2	+4	2	6	+1	+3	2
7	+1	-2	3	7	-1	+1	2	7	0	+2	2
8	+1	-1	2	8	-1	-1	0	8	0	0	0

2. 主要成分

成分名	%	成分名	%
C	0.67	W	-
Mn	0.89		
Cr	17.82		

3. 表面硬さ (HS) (HRC)

	硬さ (HRC)		硬さ (HS)
A	60.5	A	75
B	60.0	B	75
C	60.0	C	73
D	60.5	D	72
E	60.0	E	75
F	60.0	F	75
G	60.0	G	72
H	60.5	H	73
I	60.0	I	76
J	60.5	J	75
K	60.5	K	77

☆真空熱処理の昇温時間☆

4.6°C/分

表4：低合金鋼（高炭素クロム軸受鋼）S U J 2の真空熱処理後の物性値

1. ひずみ測定 (μm)

測定位置 (1)				測定位置 (3)				測定位置 (5)			
No.	加工後	焼入後	否 み	No.	加工後	焼入後	歪 み	No.	加工後	焼入後	歪 み
1	0	0		1	0	0		1	0	0	
2	0	+ 2	2	2	0	+10	10	2	+ 1	+ 5	4
3	0	+ 5	5	3	+ 2	+21	19	3	+ 1	+14	13
4	+ 2	+16	14	4	+ 3	+38	35	4	+ 3	+19	16
5	+ 2	+21	19	5	- 1	+36	37	5	+ 3	+21	18
6	0	+14	14	6	- 1	+34	35	+ 2	+ 2	+20	18
7	- 1	+12	13	7	+ 1	+19	18	7	+ 1	+17	16
8	0	+ 7	7	8	+ 1	+ 6	5	8	+ 1	+ 4	3
測定位置 (2)				測定位置 (4)				測定位置 (6)			
1	0	0		1	0	0		1	0	0	
2	+ 1	+ 7	6	2	+ 1	+ 7	6	2	+ 3	+ 2	1
3	0	+22	22	3	+ 2	+19	17	3	+ 2	+ 3	1
4	+ 2	+32	30	4	+ 2	+23	21	4	+ 4	+ 8	4
5	+ 3	+36	33	5	0	+20	20	5	+ 5	+10	5
6	+ 1	+34	33	6	- 1	+16	17	6	+ 2	+ 6	4
7	0	+21	21	7	- 2	+17	19	7	+ 3	+ 7	4
8	- 1	+ 9	10	8	- 1	+ 5	6	8	+ 1	+ 3	2

2. 主要成分

成分名	%	成分名	%
C	1.06	W	—
Mn	0.34		
Cr	1.47		

3. 表面硬さ (HS) (HRC)

	硬さ (HRC)		硬さ (HS)
A	57	A	66
B	55	B	55
C	49	C	56
D	49	D	56
E	57	E	57
F	61	F	66
G	57	G	63
H	58	H	72
I	62	I	78
J	58	J	79
K	60	K	78

☆真空熱処理の昇温時間☆

4.3°C/分
---------



表5：各種合金鋼の焼入れ、焼もどし後の硬さ

硬さ 合金鋼名	HRC		HS	
	最高値	最小値	最高値	最小値
S U S 440 A	60.5	60.0	77	72
S U J 2	62.0	49.5	79	56
S K S 3	66.5	64.0	82	78
S K D 11	64.0	62.5	82	79
S K D 61	55.5	54.5	70	67
S K 3	65.0	63.5	84	75
S N C M 439	45.5	43.0	52	51

鋼種である。

表6, 図6は段差を7mm→3.5mmへ小さくした各種合金鋼のひずみ量である。

厳しい段差が半分になった結果、油冷鋼特に、ひずみが325 $\mu\text{mMax}$ と大きかったSKS3が109 $\mu\text{mMax}$ と1/3に低下した。当初このSKS3は、720 $\mu\text{mMax}$ ものひずみがあったが、ヒートパターン制御(12.8°C/分→4.3°C/分)で325 $\mu\text{mMax}$ になっていた。段差の縮小によって更に、大幅に形状変形を抑えることができた。適切な熱処理が重要となる低合金油冷鋼の特徴を良く表わしている。

SK3, SUJ2も油冷鋼であるが、硬さ、ひずみと

表6：段差(7mm→3.5mm)を小さくした各種合金鋼のひずみ量

No.	合金鋼名	測定位置(図1)					
		① 27 mm	② 83 mm	③ 100 mm	④ 130 mm	⑤ 145 mm	⑥ 172 mm
0	S U S 440 A	3	6	5	4	3	2
5	S U J 2	19	33	37	21	18	5
1	S K S 3	55	103	109	104	87	9
2	S K 3	22	41	43	27	19	5
3	S K D 11	6	3	2	3	4	3
A	S K D 61	13	31	39	39	22	3
7	S N C M 439	96	167	173	138	97	8

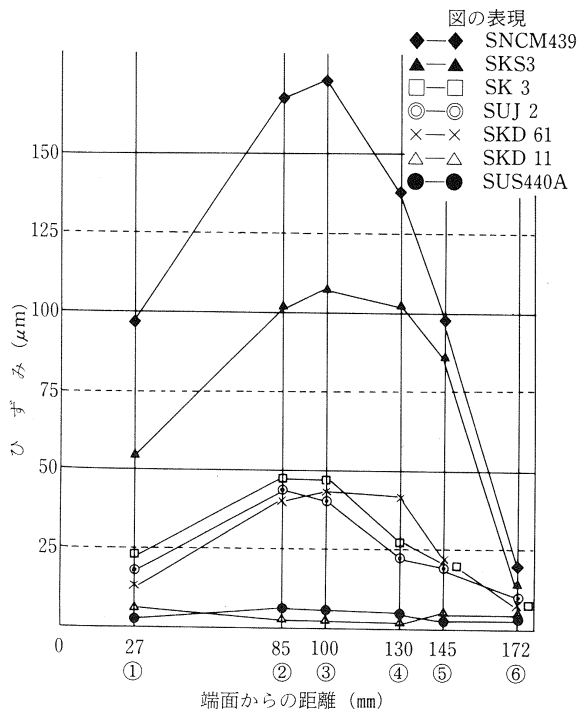


図6：金型用合金鋼の歪み(段差7mm→3.5mm)

もSK3が優れた性質を有している。炭素工具鋼のSK3はマルテンサイト単相組織で、炭化物や中間組織を形成する合金鋼のように、組織方向要因による影響を受けにくいからである。

SUS440A, SKD11等の高合金ガス冷鋼は、体積変化に関しては、炭化物による収縮で一定の範囲(0.034mm~0.115mm/175mm)で不可避だが、ひずみについては、ヒートパターン制御(4.6°C/分)で5~6 $\mu\text{m}/175\text{mm}$ 以下に抑え込むことができた。

この2鋼種に比べてSKD61は熱間の高合金鋼で、焼もどし温度(600°C)が高いだけに焼もどしによる形状変形が加味され、41 $\mu\text{mMax}$ と大きくなった。

熱処理における究極の課題は形状の変形である。中でも相変態による体積変化は対応が困難だが、ひずみは熱処理の考案で充分対処することができた。

今後、典型的な形状の試験片を作成し、仮想のひ

ずみや体積変化を実験上作り出し、対応策を考えていく必要がある。

## 5. おわりに

熱処理は、加熱・冷却とも真空中で行い、段階的加熱方法を採用した。特に変態区間を全断面が齊一に通過できるように、変態点直下で18分間と12分間の2度均熱した。本実験から、体積変化・形状変形について次のような物理的性質が見出された。

1) 焼入れによる合金鋼の体積変化は、マルテンサイト変態による膨脹が低合金油冷鋼に0.133 mm/175 mm 発生し、炭化物による収縮が高合金ガス冷鋼に0.077 mm/175 mm おこった。

この膨脹・収縮は形状変形にも影響するが、その因果関係は完全には捉えられないし、相変態によるものだけに防止することも難しい。急冷硬化後の難加工を考えると事前に、鋼種によってプラス側か逆にマイナス側へ加工する必要がある。この方法を一部の会社で採用し成功している。

2) ひずみはヒートパターン制御と段差を小さく

する方法で、175 mm の長さで720  $\mu\text{mMax}$  が325  $\mu\text{mMax}$ 、更に、109  $\mu\text{mMax}$  と大幅に向上させることができた。炭素工具鋼 (SK 3) では43  $\mu\text{mMax}$  まで低下させることができた。油冷鋼ではこの辺の数値がほぼ限界ともいえる。

高合金ガス冷鋼は、SKD 11, SUS 440 A とも5~6  $\mu\text{mMax}$  以下、高温焼もどしのSKD 61でも39  $\mu\text{mMax}$  と優れた結果をえた。

形状変形は、熱処理技術の考案で著しくその変形を抑えることが可能である。

相変態による体積変化、加熱・冷却に伴う形状変形いずれも熱処理における永遠の課題である。

更に、変態点直下の均熱時間の延長、加工形状、板厚等、種々のケースを設定して追求していく必要がある。

この実験に使用した真空熱処理炉は日本自動車振興会から、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で研究発表)