

# 真空熱処理による合金鋼の球形化について

金属科 江 藤 博 明  
電子科 藤 井 謙二郎

## 1. はじめに

各種の合金鋼には、数パーセントから十数パーセントもの特殊元素が添加されている。これらの合金鋼の優れた特性を引き出すためには、高い温度範囲(830°C~1200°C)で熱処理をすることが不可欠である。

合金鋼に高温熱処理を施すと、特殊元素が炭化物を形成し、素地はマルテンサイトとなり高耐摩耗性材料となるが、同時に、この変態に伴い膨脹あるいは収縮等の体積変化が起こる。

この体積変化に伴う形状変形は、金型や刃物工具等の製作上大きな障害となる。これを解明することは熱処理における急務の課題である。

本実験では、この変形がある一定の方向性(球形化)を持つことに着目してこれを究明した。

## 2. 供試材

多種多様な合金鋼があるが、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。

今回は、金型等に一般に使われる代表的な鋼種の中から高合金鋼・低合金鋼、それぞれ3種類ずつを選んだ。

これらの供試材は、加工前に高合金鋼は850°Cで、低合金鋼は770°Cで徐冷して球状化焼なましを行った。

各材料の主な化学成分は表1のとおりである。

## 3. 実験方法

前年度までの合金鋼の物理的性質の研究によって、高温加熱・冷却に伴う体積変化・形状変形に一定の方向性があることに着目して実験を進めた。

体積変化の測定は測長器を使用した。

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	—	—	—
1	SKS 3	0.89	1.01	0.72	—	0.60	—
2	SK 3	1.02	0.96	—	—	—	—
3	SKD11	1.38	—	11.80	0.87	—	0.21
4	SNCM439	0.44	—	0.70	—	Ni 1.63	—
5	SKD61	0.36	Si 0.90	4.68	—	—	—

形状変形については、測定点を3点に絞はり、写真1のように電子マイクロメータで測定した。

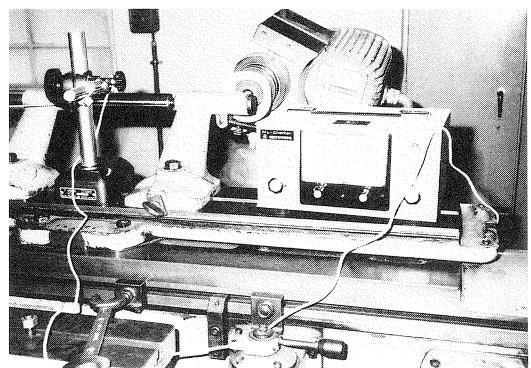


写真1：電子マイクロメータによる形状変形測定

体積変化、形状変形、硬さ、断面組織等の測定位置は図1、写真2のとおりである。

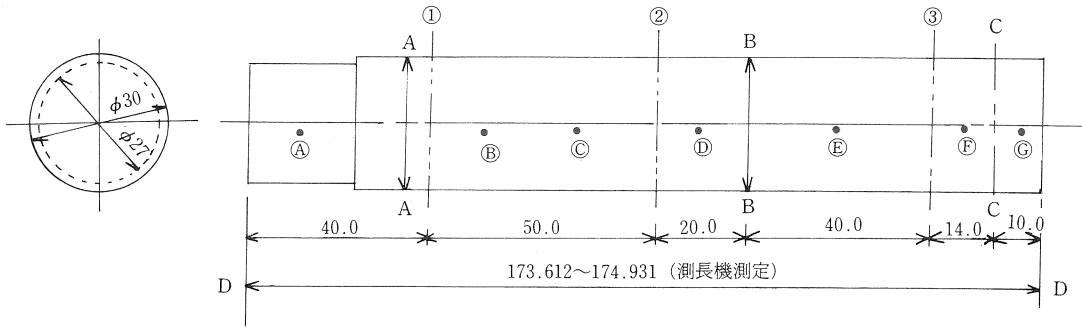


図1：真空焼入試験片と体積変化・形状変形・硬さ測定位置



写真2：高合金鋼の真空熱処理後の試験片

#### 4. 実験結果および考察

多量の特殊元素を含んだ合金鋼は、熱処理によって、その性質を飛躍的に高めている。

熱処理の中でも、焼入れは最も重要で、金属材料の高機能化を図るものである。しかし、焼入れは、高温に加熱した鋼を急冷するだけに、急冷硬化に伴う熱ひずみと体積変化が同時に起こる。

本実験では、焼入れ硬化に伴う変形がどのような方向性を持つか究明した。

焼入れ時の加熱・冷却はすべて真空中で処理し、1025°Cガス冷と860°C油冷で行った。

焼もどしは、変態点以下の温度（冷間の合金鋼は175°C、熱間の合金鋼は170°Cで一度、更に600°Cに加

熱し、再度形状変形の測定をした。）で処理した。

この焼もどし処理によって、未変態オーステナイトの安定化と炭化物の析出硬化、 $\alpha \rightarrow \beta$  マルテンサイト等、不安定な焼入れ状態の組織を安定化し、球形化現象の追求および形状測定を行った。

図2は本実験のフローチャートである。

##### 4-1) 体積変化と球形化現象について

焼入れ時の熱膨張は、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。金型や金型部品、刃物工具等の製作上、最終段階で寸法変化を起こす微妙なポイントである。

表2は焼入れ・焼もどし後の直径の変化である。高合金ガス冷鋼である SUS440A, SKD11, SKD61 が  $6 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$  ( $0.2 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}/\text{mm}$ ) と変化の少ない好結果を得た。特に、SKD11のように  $8 \mu\text{m}$  の収縮を起こしたものもあるように、Cr炭化物、W炭化物の生成で硬化したことを示している。

図3のように SKS 3, SK 3 の低合金油冷鋼は、 $34 \mu\text{m}$  から  $44 \mu\text{m}$  ( $1.1 \mu\text{m} \sim 1.4 \mu\text{m}/\text{mm}$ ) の範囲で膨張して直径が大きくなった。マルテンサイト変態が硬化の主体であることを示した。同じ油冷鋼でも SNCM439 は  $4 \mu\text{m}$ 、調質 ( $605^\circ\text{C}$  もどし) すると  $1 \mu\text{m}$  とほとんど直径の変化は認められない。低炭素のためマルテンサイト変態量が少ないからである。

これに対して表3は焼入れ・焼もどし後の長さの変化である。長さの体積変化は、高合金鋼の SUS440A, SKD11, 61 が収縮を起こした。炭化物生成に伴う相変態が原因である。

収縮量は SUS440A が  $57 \mu\text{m}$  ( $0.3 \mu\text{m}/\text{mm}$ ) SKD11 が  $35 \mu\text{m}$  ( $0.2 \mu\text{m}/\text{mm}$ ) と低いが、熱間工具鋼の SKD61 は  $124 \mu\text{m}$  ( $0.7 \mu\text{m}/\text{mm}$ ) と大きな値となっ

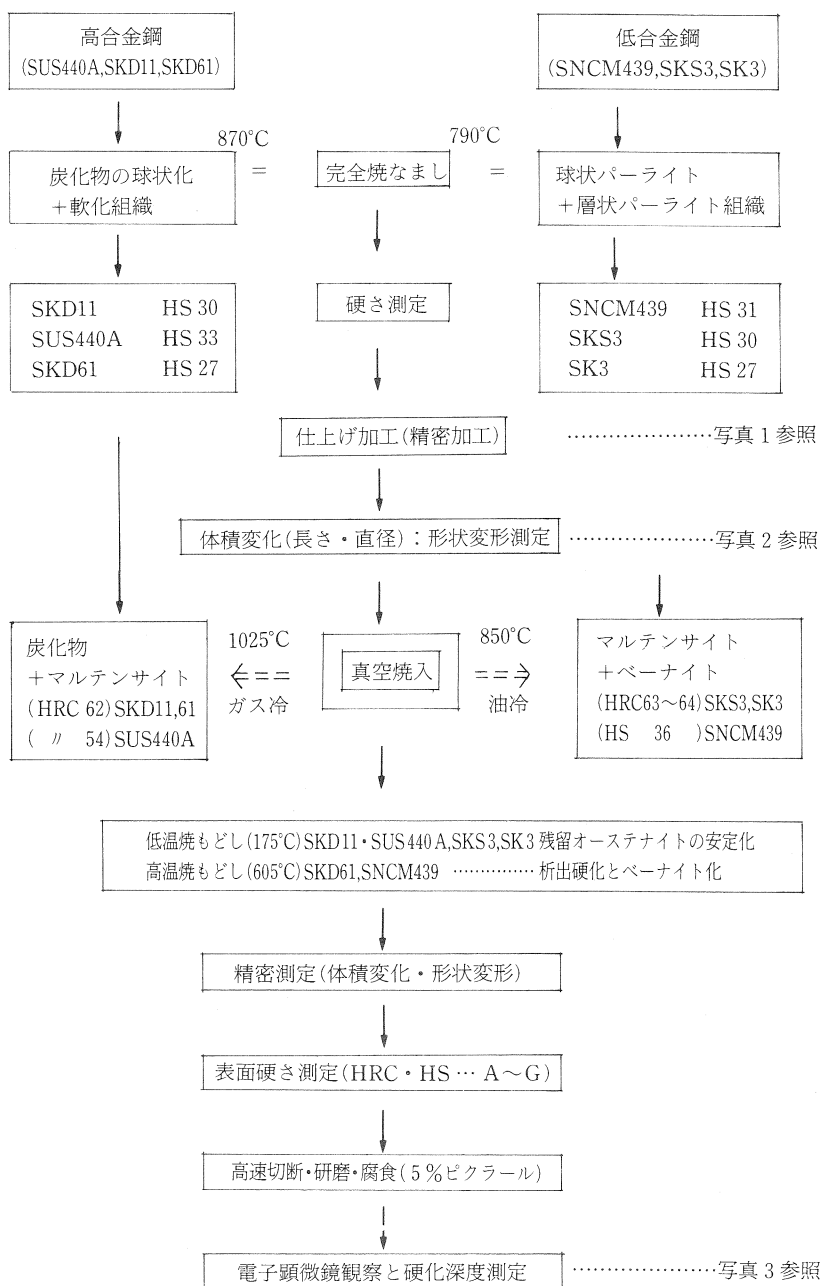


図2：本実験のフローチャート

た。更に、所定の605°Cの高温もどしを行なうと炭化物の析出が進行し、153 $\mu$ m (0.9 $\mu$ m/mm) もの収縮を起こした。

逆に、高炭素低合金鋼はマルテンサイト変態による膨脹が著しく、特に、SKS 3が165 $\mu$ m (0.9 $\mu$ m/

mm) と最も大きく、SK 3が98 $\mu$ m (0.9 $\mu$ m/mm) SNCM439が68 $\mu$ m (0.4 $\mu$ m/mm) とマルテンサイト変態による膨脹がはっきり示された。

長さの変化でも、低炭素鋼の SNCM439は、高温の焼もどしの影響は全く受けず、64 $\mu$ m と焼入れによ

表2：焼入れ・焼もどしによる直径の変化について

単位 (mm)

番号	鋼種名	熱処理	A点 (先端から35mm)			B点 (先端から114mm)			
			基点 (0°)	右廻り90°	変化量	基点 (0°)	右廻り90°	変化量	
0	SUS440A	前	30.306	30.305	+0.006	30.308	30.307	+0.006	
		後	30.312	30.310	0.006   0.005	30.315	30.312	0.007   0.005	
5	SKD61	前	30.300	30.299	+0.015	30.287	30.288	+0.017	
		後	30.307	30.321	0.007   0.022	30.297	30.312	0.010   0.024	
3	SKD11	前	30.293	30.294	-0.008	30.304	30.303	-0.009	
		後	30.286	30.286	-0.007   -0.008	30.295	30.294	-0.009   -0.009	
2	SK 3	前	30.391	30.391	+0.040	30.390	30.392	+0.025	
		後	30.431	30.431	0.040   0.040	30.415	30.416	0.025   0.024	
2.2	SK 3	前	30.321	30.320	+0.034	30.328	30.329	+0.044	
		後	30.361	30.347	0.040   0.027	30.373	30.372	0.045   0.043	
4	SNCM439	前	30.367	30.365	+0.004	30.354	30.355	+0.006	
		後	30.366	30.370	-0.001   0.005	30.357	30.363	0.003   0.008	
1	SKS 3	前	30.293	30.292	+0.044	30.295	30.296	+0.041	
		後	30.338	30.335	0.045   0.043	30.336	30.336	0.041   0.040	
5.6	SKD61	前	30.300	30.299	+0.012	30.287	30.288	+0.013	
		後	30.304	30.320	0.004   0.021	30.291	30.311	0.004   0.023	
4.6	SNCM439	前	30.367	30.365	+0.001	30.354	30.355	+0.003	
		後	30.365	30.368	-0.002   0.003	30.356	30.360	0.002   0.005	

5.6および4.6は熱間の合金鋼なので高温焼もどし (600°C) を施した

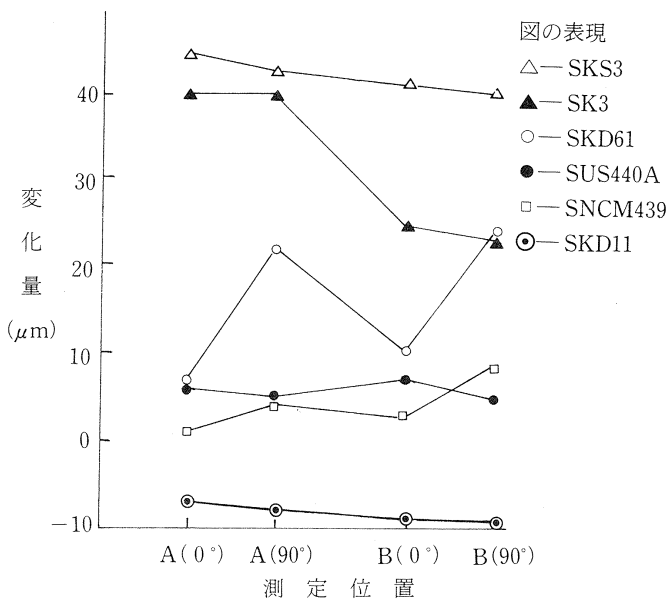


図3：各種合金鋼の直径の変化

る膨張がわずかながら少なくなった。変態を起こす炭化物の絶対量 (表1の化学成分参照) が少ないからである。しかし、硬さは焼入れ時でHS34~36, 605°Cで焼もどすとHS30と金型に使えるような硬化を示す材料ではない。

図4は低合金・膨脹, 高合金・収縮を表わしたものである。

この結果から球形化率を検討してみると、焼入れによって、長さが短くなり、直径が増えた球形化のはっきり表われたものが、高合金鋼のSKD61とSUS440Aである。

SKD61は直径が16μm膨脹し、長さが124μm収縮, SUS440Aは6μmの膨脹, 57μmの収縮となった。

焼入れによる変形率は、変形量÷元の長さ×100

表3：焼入・焼戻しによる長さの変化について

単位 (mm)

No	鋼種名	熱処理	長さ	変寸量	焼入形態	現象
0	SUS440A	前	174.617	-0.057	ガス冷	炭化物収縮
		後	174.560			
5	SKD61	前	174.133	-0.124	ガス冷	炭化物収縮
		後	174.009			
3	SKD11	前	174.931	-0.035	ガス冷	炭化物+ マルテンサイト
		後	174.896			
2	SK 3	前	173.612	+0.098	油冷	マルテンサイト膨張
		後	173.710			
2.2	SK 3	前	174.771	+0.127	油冷	マルテンサイト膨張
		後	174.898			
4	SNCM439	前	174.703	+0.068	油冷	ベーナイト+ パーライト変化なし
		後	174.771			
1	SKS 3	前	174.622	+0.165	油冷	マルテンサイト+ 微量炭化物膨張
		後	174.787			
5.6	SKD61	前	174.133	-0.153	ガス冷	炭化物+ 焼もどしマルテンサイト
		後	173.980			
4.6	SNCM439	前	174.703	+0.064	油冷	ソルバイト+ パーライト
		後	174.767			

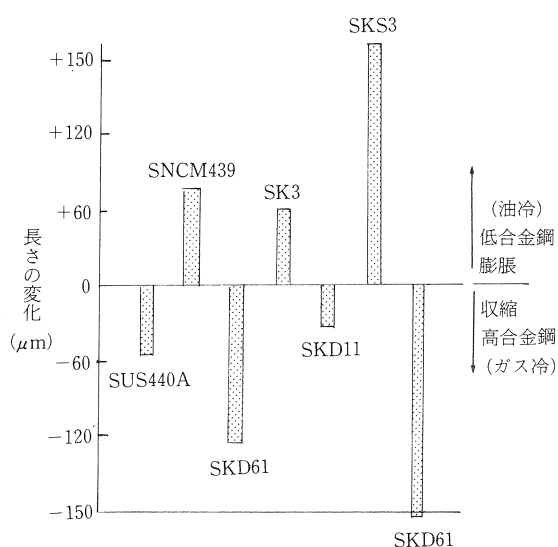


図4：各種合金鋼の長さの変化

で、直径の変形率+長さの変形率=球形化率となる。直径は膨脹する程、長さは短くなるほど球形化率は進んでいる。

SKD61が直径が0.05%、長さが0.07%で0.12%の球形化である。SUS440Aが0.02%+0.03%=0.05%の球形化率となった。同じ高合金鋼でもSKD11は直径も長さも収縮を起こしているため、直径は球形化からはマイナス現象であるため、 $-0.03\%+0.02\%=-0.01\%$ となり球形化ではなく、Cr炭化物を主体とした高機能化(HRC63)収縮材料といえる。

低合金油冷鋼については、SKS 3が直径で0.14%球形化にとってはプラス要因の膨脹を呈し、長さは0.09%膨脹しているため逆にマイナス要因で、 $0.14\%-0.09\%=0.05\%$ の球形化となった。SK 3も $0.11\%-0.05\%=0.06\%$ の球形化となり、高炭素系の両鋼種は、同傾向・同程度の球形化率を示した。

表4、図5はともに膨脹・収縮に伴う球形化率を

表わしたものである。

表 4：各種合金鋼の球形化率

単位：%

合金鋼名	直径の変形率	長さの変形率	球形化率
SUS440A	0.02	0.03	0.05
SKD61	0.05	0.07	0.12
SKD11	-0.03	0.02	-0.01
SKS 3	0.14	-0.09	0.05
SK 3	0.11	-0.05	0.06
SNCM439	0.00	-0.04	-0.04

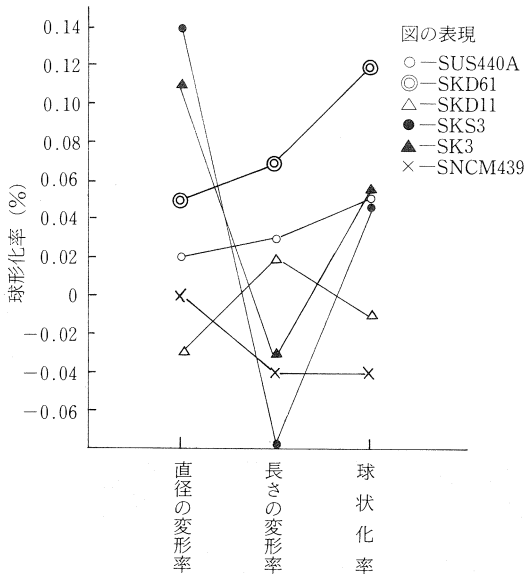


図 5：各種合金鋼の球形化動向

高合金鋼は収縮して球形化（0.05～0.12%）し、低合金鋼は膨脹して球形化（0.05～0.06%）する現象がとらえられた。

写真3は実際に使用されている金型や刃物工具等で、焼入れ焼もどし後に体積収縮を起こしたものである。変形分を修正して加工代をつけて成功したものである。

4-2) 形状変形（ひずみ）について

試験片に限らず、実際に使用される金型でも、ひずみに関しては加工形状よりも昇温速度の影響を強く受けやすい（物理的性質第2・3報）。この点に着

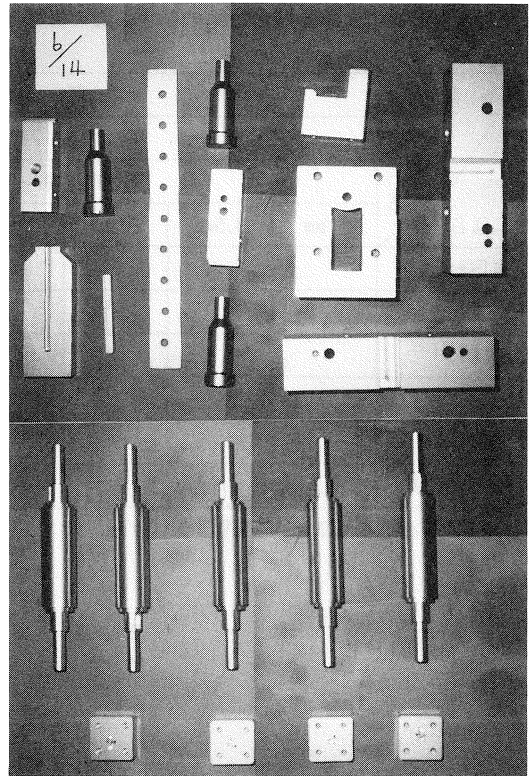


写真 3：金型や刃物工具等の実例  
上：SKD11 下 HPM38

目して、これまでは段差（Φ30対Φ16あるいはΦ23）をつけた試験片でその物理的性質を追ったが、今回はストレートで段差の無い試験片で行った。

本実験でも、昇温速度は4.6°C/分以下に制御し、階段式加熱方法を採用した。第1予熱は、加熱により加工材料の弾性が消滅する580°Cで18分間、第2予熱範囲をオーステナイトへの加熱変態域である850°Cで12分間の2度均熱した。

表5は試験片形状による本実験鋼のひずみ量の推移である。

低合金油冷鋼のSKS3に7mm→3.5mmの段差で320μmのひずみが109μmと顕著に認められたが、3.5mmと0mmの間には認められなかった。

高合金鋼では、SKD11、SUS440A等段差による影響は全くない。SKD61のみが図6のようにひずみが順次低下している。高温もどしによる析出硬化が考えられる。

熱間鋼のSKD61、調質鋼のSNCM439の両鋼種

表5：形状による各種合金鋼のひずみ量の推移

単位 (μm)

測定位置 試験片の形状 鋼種名	測定位置 (先端からの距離)								
	① 40mm			② 90mm			③ 150mm		
	試験片の形状 (段差)								
	7 mm	3.5mm	0 mm	7 mm	3.5mm	0 mm	7 mm	3.5mm	0 mm
SUS440A	—	4	11	—	5	12	—	3	5
SKD61	31	19	(12) 16	32	39	(17) 19	16	22	(6) 9
SKD11	3	4	10	4	3	15	3	2	6
SKS 3	186	79	84	320	109	118	125	87	92
SK 3	55	31	66	85	43	82	30	19	23
SNCM439	101	130	(76) 111	158	173	(96) 136	45	97	(23) 51

※ SKD61, SNCM439両鋼種の形状0mmの( )内ひずみ量は低温もどし。

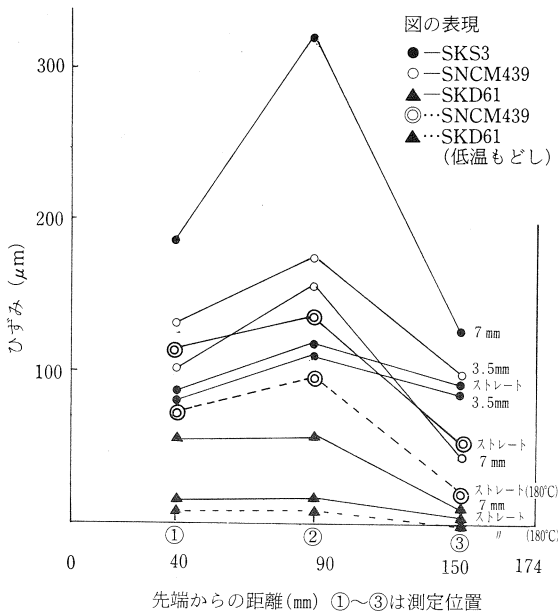


図6：焼もどしおよび形状による合金鋼のひずみの動向

は、600°Cの高温もどしを施すことによって、炭化物の析出硬化、靱性を高めるなどその機能が充分に発揮される。

しかし、高温もどしは76μm → 111μm, 96μmが136μmと2度に亘る高温処理で、図6に点線で示すようにひずみには大きく影響した。

この結果から、ひずみは昇温速度に最も影響を受け、続いて焼もどし温度ということが判明した。

4-3) 高合金鋼 (SKD11) の焼入れ焼もどし組織について

焼入れ加熱 (1025°C ± 3°C) 後、オーステナイト中へ炭化物を充分に固溶させる目的で、30分間保持してガス冷した。

写真4のように、高炭素・高Cr合金であるため、

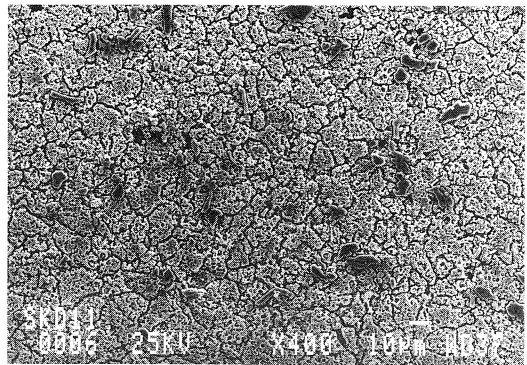


写真4 SKD11の焼入れ焼もどし組織 (×400)

- 試料名称 SKD11 HRC62.5~64.0
- 形状と熱処理 φ30 1025°Cガス冷・175°C空冷
- 化学成分 C : 1.38%, Cr : 11.80%  
Mo : 0.87%, V : 0.21%
- 腐食液 5%ピクリン酸アルコール
- 組織の解説 炭化物 (Cr・Fe・Mo)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, 素地焼もどしマルテンサイト

Cr 炭化物が主体で硬くなっているが、1.38%ものCを含んでいるので、マトリックスはマルテンサイトとなっている。Cr を多く含む残留オーステナイトも180°C焼もどしで安定化状態となっている。

炭化物は  $(Cr \cdot Fe \cdot Mo)_7C_3$  の状態であるが、写真5のように、5,000倍の電子顕微鏡観察では、Cr (11.8%含) 炭化物が凝集している部分も多くみられる。

硬さは、HRC63~64 (HS81~83) で高い平均した値を呈した。焼入れ性が良いと云われる所以である。

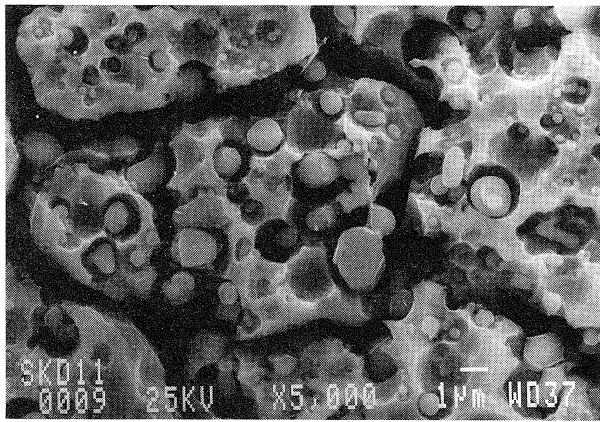


写真5 SKD11のCr炭化物の凝集組織(×5,000)

## 5. おわりに

形状変形が昇温速度に大きく左右されるので、4.5°C/分でヒートプログラムを設定した。

特に、加熱により試験片の弾性が消滅する温度の570°Cで18分間、オーステナイト変態域の850°Cで12分間、全断面が齊一に変態区間を通過できるよう第1、第2予熱をおこなった。

本実験から、球形化現象、形状変形(ひずみ)について次のような物理的性質が見出された。

### ① 球形化について

高合金鋼のSUS440A, SKD61は、長さが57 $\mu$ m, 124 $\mu$ mと収縮したが、直径はそれぞれ6 $\mu$ m, 17 $\mu$ mと膨脹した。SUS440Aが0.05%, SKD61は0.12%の球形化となった。

低合金鋼のSKS 3, SK 3は、長さが165 $\mu$ m, 98 $\mu$ m, 直径が43 $\mu$ m, 34 $\mu$ mとともに膨脹しながら、0.05%, 0.06%の球形化となった。

高い寸法精度を必要とする精密金型等は、あらかじめ、試験片で変形率を確認し、変形分を修正した加工代をつけることが肝要である。

### ② 形状変形(ひずみ)について

曲がり、ひずみ等は昇温速度の影響を強く受ける。12.5°C/分→4.5°C/分に制御すれば、SKS 3のように755 $\mu$ mが320 $\mu$ mと大幅に改善される。

試験片の段差による変化は、低合金鋼が急冷硬化(マルテンサイト変態)に伴ってSKS 3が320 $\mu$ m→109 $\mu$ m, SK 3は85 $\mu$ m→66 $\mu$ mのように認められたが、高合金鋼のガス冷鋼ではほとんど影響がなかった。このことは、複雑形状な金型等を作成する場合には、冷却の緩やかな高合金ガス冷鋼を使用する必要がある。

この実験に使用した真空熱処理炉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で研究発表)