

真空熱処理による合金鋼の球形化 (第2報)

金属科 江藤博明
電子科 藤井謙二郎

1. はじめに

特殊元素を多量に含んだ高合金鋼は、熱処理によって高機能化され、精密金型や治工具等に利用されている。

しかし、高合金鋼に高温熱処理を施すと、膨脹あるいは収縮等の形状変形がおこる。

この変形がある一定の方向性即ち球形化することに着目して、金属材料の異方性・相変態・冷却の3点からこれを究明した。

2. 供試材

冷間(熱間)金型用合金鋼として優れた性質を発揮するように、Cr, W, Mn, Mo, V等を添加した高合金鋼(SKD61, SUS440A, SKD11)を本実験では使用した。

供試材は、加工前に850°C1時間保持後、炉冷して完全焼なましをした。

表1は、本実験鋼の主要成分である。

表1 供試材の主要成分 (%)

No.	材 料 名	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1	SKD61	0.36	—	0.90	5.21	1.26	1.15
2	SUS440A	0.67	0.89	0.84	17.82	—	—
3	SKD11	1.38	0.31	—	11.80	0.87	0.39

3. 実験方法

体積変化測定は、図1に示すように端面から中央に向かって、直径の6点測定を行って変化量の推移を追求した。

熱処理条件は次のとおりである。

① JIS規格に則った標準的熱処理法(1035°Cガス冷、

180°C・595°C空冷)

② 焼入温度を高くして形状変形を大きくする。

(1125°C)

③ 繰り返し焼入れを行うことによって球形化を増幅させる。

なお、直径、長さ等の精密測定は、標準温度20°C

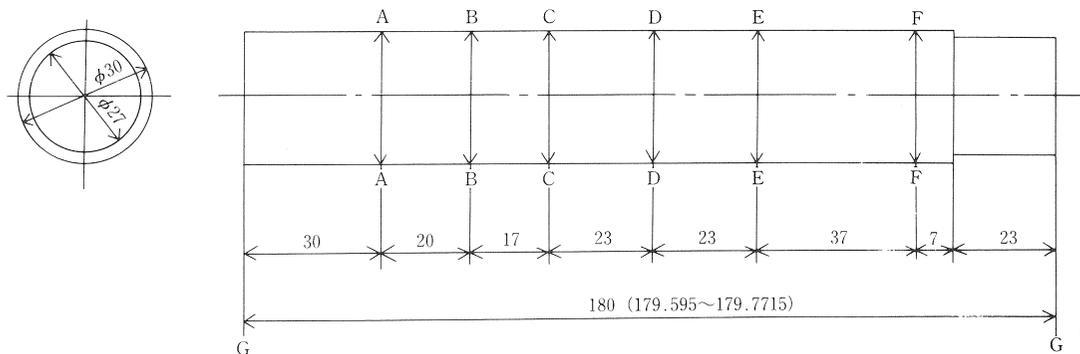


図1 真空焼入試験片と球形化現象測定位置 (A→F)

に48時間以上保持後、測長器で測定した。

写真1は測長器での直径の測定である。

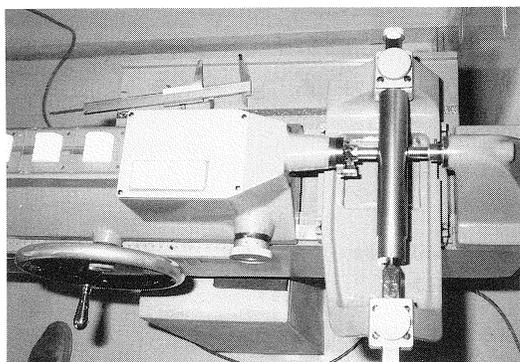


写真1 測長器による体積変化測定

4. 実験結果および考察

焼入加熱時の熱膨脹は、冷却とともに常温で元に戻るが、相変態や材料の異方性等による体積変化が熱処理にとって大きな課題となっている。

前報で、直径と長さの部分的対比から球形化を導きだしたが、本実験では、一步進めて端面から中央に向かっての球形化の進行状況を究明した。

○球形化について

合金鋼の熱処理変形は図2に示すように次の3つの原因が想定される。

① 冷却から考えられる体積変化

端面から冷却が進むので収縮し、最後に冷える中央部が膨脹する。

② 相変態から考えられる糸巻状変形

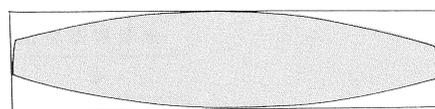
炭化物の生成、マルテンサイト・ベイナイト変態等による収縮および膨脹に起因する変形。

③ 材料の異方性（結晶方向・圧延方向）から考えられる球形変形（①相変態+②冷却も含む）

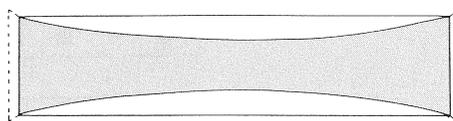
直径が膨脹し、長さが収縮する。焼入れ前より“ずんぐりむっくり”になる球形化現象が第1報では認められた。

本実験では、この球形化を増幅させるため、図3のフローチャートのように繰り返し焼入れをして、体積変化を追求した。

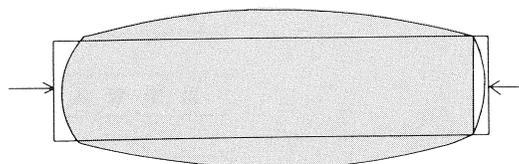
表2は焼入れ、焼もどしによる直径の変化である。JIS規格に則った焼入れ、焼もどし後の直径の変化は、3鋼種とも球形化プラス要因となった。熱間鋼



① 冷却から考えられる体積変化



② 相変態から考えられる糸巻状変形



③ 材料の異方性（結晶方向・圧延方向）から考えられる球形変形（相変態+冷却も含む）

図2 高温焼入によって想定される合金鋼の熱処理変形

のSKD61が $18\mu\text{m}$ から中央 $25\mu\text{m}$ (0.08%)と大きく、SUS440Aが $4\mu\text{m} \rightarrow 6\mu\text{m}$ (0.02%), SKD11が $3\mu\text{m} \rightarrow 7\mu\text{m}$ (0.02%)と球形化率の差こそあれ中央に向かって図4のように円弧の変形が認められた。繰り返し焼入れを行うと、図5のように球形化率は大きくなる。SKD11が中央 $25\mu\text{m}$ が $38\mu\text{m}$ (0.08% \rightarrow 0.13%), SUS440Aは同 $6\mu\text{m}$ が $17\mu\text{m}$ (0.02% \rightarrow 0.07%)と球形化が進む。繰り返し焼入れをすることによって変形が進行し、球形化率を高めている。SKD11のみが再焼入れを行うと変形が $\pm 1\mu\text{m}$ と好結果が得られた。しかし再々焼入れでは、 $1\mu\text{m}$ が $-19\mu\text{m}$ (0.00% \rightarrow 0.08%)となり、変形が異なった方向性を有するようになる。更に、焼入れを繰り返すと図6のように再び $\pm 1\mu\text{m}$ に回復する。高合金鋼の焼きもどし効果のような、炭化物による収縮現象が原因である。

繰り返し焼入れから更に、過熱 (1125°C) 焼入れを行うと、図7のように変形は大幅に進む。

これまで球形化にプラス要因のみの変形であった。SUS440Aがマイナス要因の変形で、 $21\mu\text{m}$ から $-59\mu\text{m}$ (0.07% \rightarrow -0.20%)と $80\mu\text{m}$ (0.27%)もの変形が起こった。

SKD11は、4回目の繰り返し焼入れで $\pm 3\mu\text{m}$

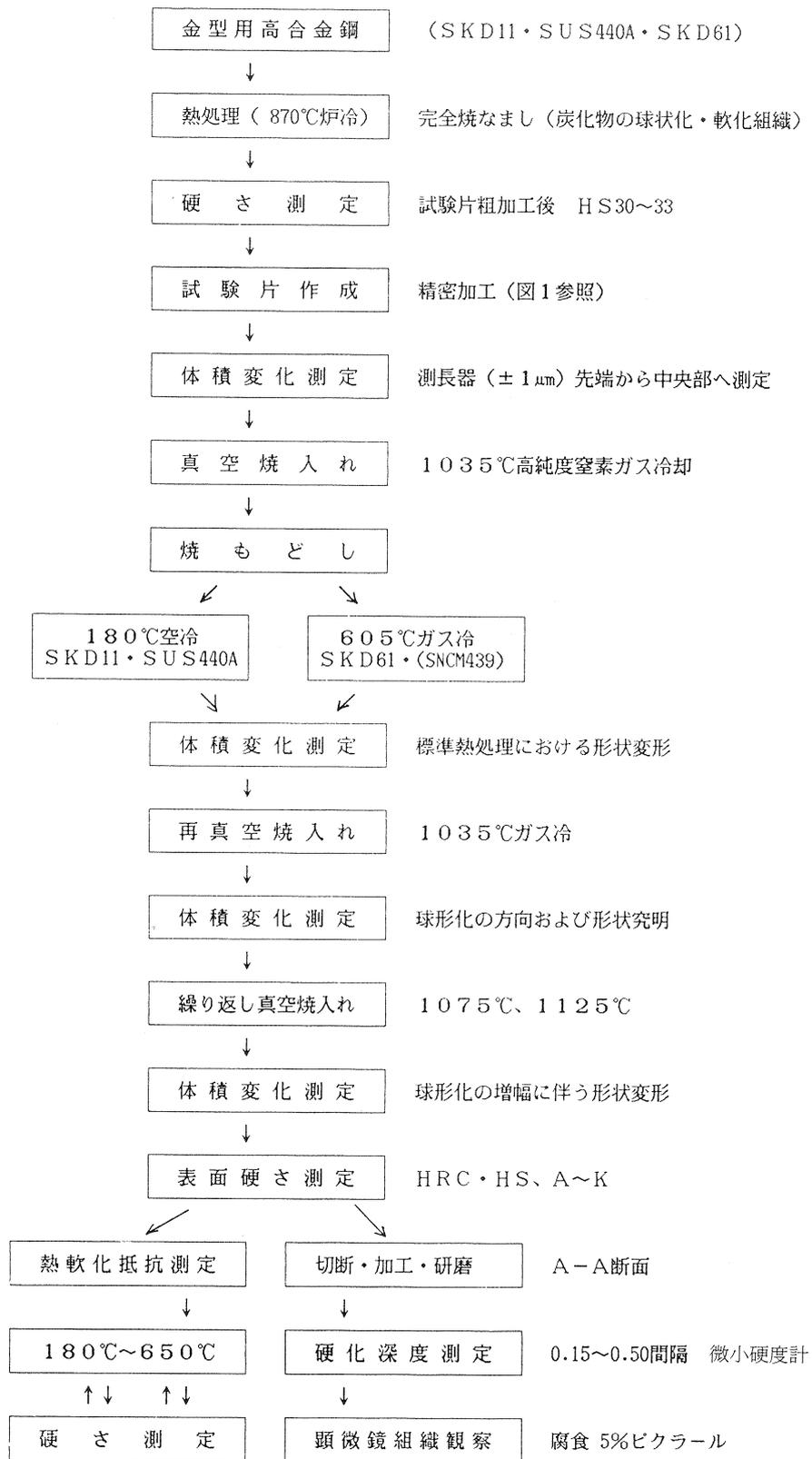


図3 本実験のフローチャート

表2 焼入れ・焼もどしによる直径の変化（焼入れ前の状態を基とした変化量）

No	鋼種名 処理方法	A点 (31mm)			B点 (50mm)			C点 (67mm)			D点 (90mm)			E点 (113 mm)			F点 (150 mm)		
		基点0	右廻90	変化量	基点0	右廻90	変化量	基点0	右廻90	変化量	基点0	右廻90	変化量	基点0	右廻90	変化量	基点0	右廻90	変化量
1	SKD61	30.141	30.141	*	30.141	30.140	*	30.142	30.140	*	30.140	30.139	*	30.145	30.141	*	30.150	30.149	*
	1035°C 焼入れ後 175°C	30.161 + 20	30.157 + 16	+0.018	30.167 + 26	30.155 + 15	+0.020	30.166 + 26	30.157 + 17	+0.022	30.169 + 29	30.159 + 20	0.08% +0.025	30.169 + 24	30.158 + 17	+0.021	30.171 + 21	30.162 + 13	+0.017
	高温もどし 600°C	30.156 + 15	30.151 + 10	+0.012	30.158 + 17	30.151 + 11	+0.014	30.161 + 19	30.152 + 12	+0.016	30.161 + 21	30.151 + 12	0.06% +0.017	30.163 + 18	30.152 + 9	+0.014	30.167 + 17	30.160 + 11	+0.014
	再焼入 1050°C	30.181 + 40	30.165 + 24	+0.032	30.183 + 42	30.168 + 28	+0.035	30.185 + 43	30.166 + 26	+0.035	30.184 + 44	30.171 + 32	0.13% +0.038	30.188 + 43	30.174 + 31	+0.037	30.192 + 42	30.176 + 27	+0.034
2 : 0	SUS440A	30.002	30.001	*	30.001	30.001	*	30.002	30.001	*	30.001	30.000	*	30.000	29.999	*	30.003	30.003	*
	1035:175°C 焼入れ後	30.006 + 4	30.006 + 5	+0.004	30.006 + 5	30.005 + 4	+0.005	30.006 + 4	30.006 + 5	+0.005	30.007 + 6	30.006 + 6	0.02% +0.006	30.006 + 6	30.004 5	+0.008	30.010 + 7	30.008 + 5	+0.006
	再焼入 1050°C	30.022 + 20	30.021 + 20	+0.020	30.022 + 21	30.021 + 20	+0.020	30.022 + 20	30.021 + 20	+0.020	30.023 + 22	30.020 + 20	0.07% +0.021	30.019 + 19	30.014 + 15	+0.017	30.024 + 21	30.022 + 19	+0.020
	過熱焼入 1125°C	29.936 - 66	29.936 - 65	-0.066	29.940 - 61	29.938 - 63	-0.062	29.940 - 62	29.939 - 62	-0.062	29.941 - 60	29.941 - 56	0.20% -0.059	29.939 - 61	29.939 - 60	-0.060	29.940 - 63	29.937 - 66	-0.065
3	SKD11	30.227	30.227	*	30.226	30.226	*	30.229	30.227	*	30.227	30.225	*	30.228	30.229	*	30.231	30.231	*
	1035:175°C 焼入れ後	30.229 + 2	30.230 + 3	+0.003	30.232 + 6	30.231 + 5	+0.006	30.235 + 6	30.234 + 7	+0.007	30.234 + 7	30.232 + 7	0.02% +0.007	30.234 + 6	30.233 + 4	+0.005	30.236 + 5	30.234 + 3	+0.004
	再焼入 1035°C	30.227 0	30.225 - 2	-0.001	30.228 + 2	30.225 - 1	+0.001	30.228 - 1	30.225 - 2	-0.001	30.228 + 1	30.225 0	0% +0.001	30.229 + 1	30.227 - 2	0	30.233 + 2	30.231 0	+0.001
	再々焼入 1075°C	30.205 - 22	30.204 - 23	-0.023	30.207 - 19	30.204 - 22	-0.021	30.208 - 21	30.207 - 20	-0.020	30.208 - 19	30.205 - 20	0.06% -0.019	30.209 - 19	30.205 - 24	-0.021	30.212 - 19	30.208 - 23	-0.021
	4回焼入 1035°C	30.227 + 0	30.224 + 3	+0.001	30.227 + 1	30.225	0	30.227 + 2	30.225	0	30.225 - 4	30.223 - 2	0.01% -0.003	30.229 + 1	30.227 - 2	0	30.232 - 1	30.230 - 1	-0.001
	過熱焼入 1125°C	30.126 - 101	30.124 - 103	-0.102	30.123 - 103	30.121 - 105	-0.104	30.125 - 104	30.122 - 105	-0.105	30.122 - 105	30.120 - 105	0.35% -0.105	30.127 - 101	30.125 - 104	-0.102	30.129 - 101	30.129 - 104	-0.102
		$(D-D') / D \times 100 + (L-L') / L \times 100 = \text{球形状率}$																	

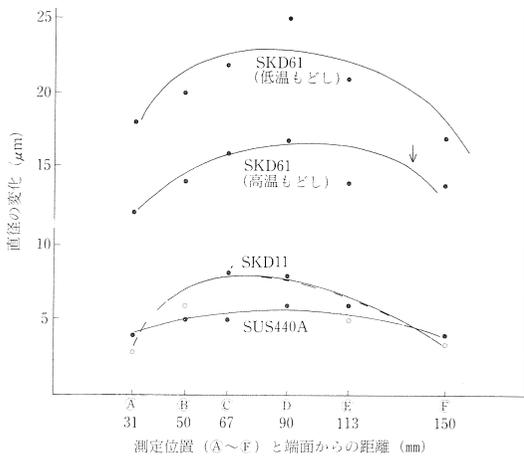


図4 JIS規格に則った焼入、焼もどし後の変形量

(0.00%) とほぼ焼入れ前の状態に近い小さな変形が、 $-105\mu\text{m}$ (-0.35%) もの大幅な収縮となった。両鋼種とも Cr が十数%以上も含まれているので炭化物による収縮が大きく、更に、 1125°C の高温下での炭化物の完全固溶による過熱組織となるのがそ

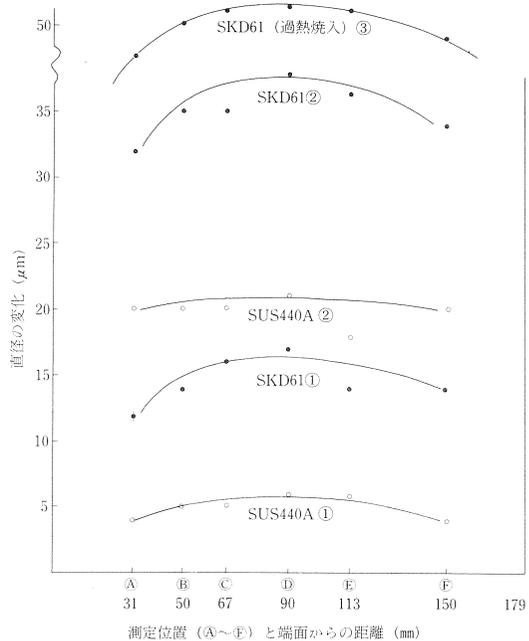


図5 繰り返し焼入れに伴う変化量の推移 (SKD61 : SUS440A)

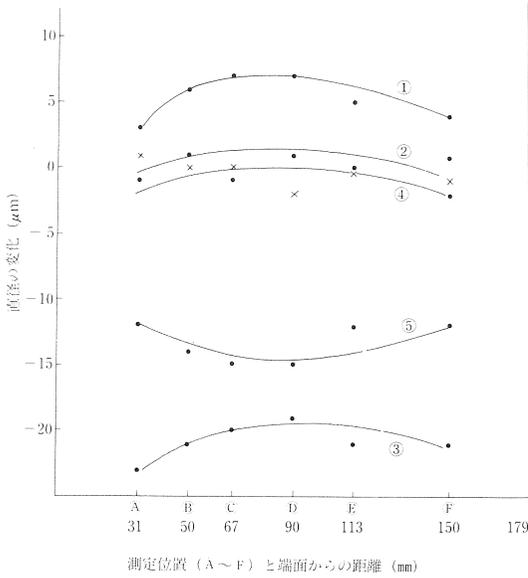


図6 繰り返し焼入れに伴う変化量の推移 (SKD11)

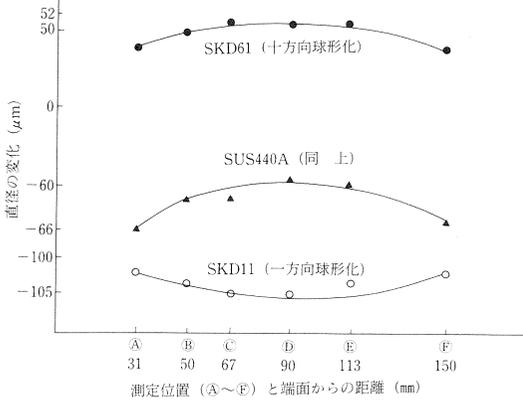


図7 過熱焼入れによる直径の変化

の原因である。

SKD61はV, Mo等の特殊元素が1%以上含まれている上に、前2鋼種に比してCrが5%と少なく必然的に炭化物の形成も少ない。17 μm (0.06%) → 38 μm (0.13%) → 51 μm (0.17%)と順次増加する変形(球形化率)で、図5に示すような球形化プラス要因の方向性のある球形変形で推移した。

図8は過熱焼入れを除いた球形化の推移を表わしたものである。中央に向かって円弧をえがくと同時に、2度焼入れを行うと変形が著しく改善される焼

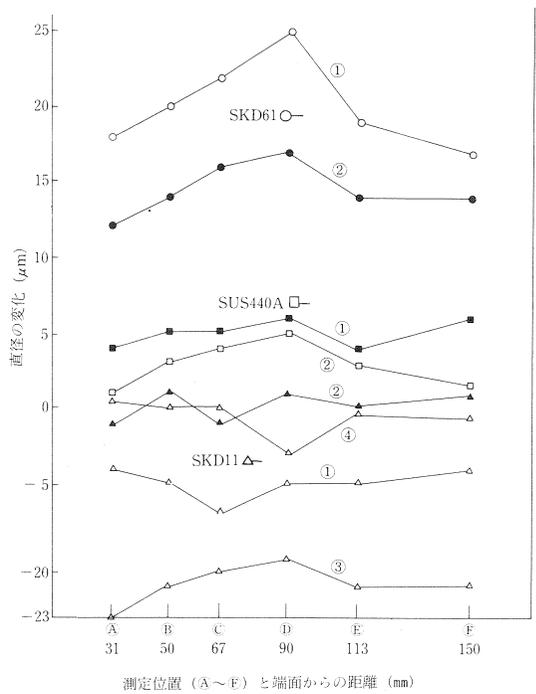


図8 繰り返し焼入れに伴う変化量の推移

もどし現象が起こった。3回以上になると変形の進行とともに球形化が増幅された。

長さの変化は、鋼種を問わず焼入れを繰り返す毎に、表3のように収縮を起こして短くなる。

特に、過熱焼入れを行うと図9に示すように、SKD61で-109 μm (0.06%)から-293 μm (0.16%)、SUS440Aは73 μm (0.04%)から476 μm (0.26%)、SKD11が+75 μm (0.04%)から317 μm (0.18%)とそれぞれ通常焼入れに比べて大幅な変形となる。

()内%は球形化プラス要因で“ずんぐりむっくり”の球形変形が顕著に現れる。図2の③型球形変形の典型である。マテンサイト変態、炭化物の生成促進による一連の相変態が原因で、材料の異方性に沿って大きな収縮が起きることが実証された。

5. おわりに

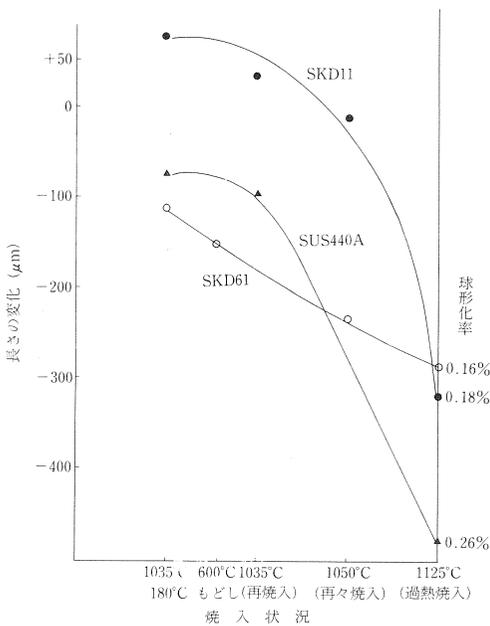
高合金鋼をJIS規格に則った標準焼入れから繰り返し焼入れ、更には、過熱焼入れを行った結果、焼入れによる変形が一定方向をもった球形化となることを見出した。

① マルテンサイト変態, Cr炭化物の生成等で高合

表3 繰返し焼入れに伴う長さの変化と変形率

No.	鋼種名	長さ	1035°C・175°C		1035°C再焼入れ		1050°C再々焼入：3		1125°C過熱焼入	
			変化長さ	変化量	変化長さ	変化量	変化長さ	変化量	変化長さ	変化量
1	SKD61	179.772	179.663	-0.109	(600°C焼 179.626 もどし)	-0.146	179.539	-0.233	179.479	-0.293
	変形率			+0.06%		+0.08%		+0.13%		+0.16%
2	SUS440A	179.651	179.578	-0.073	179.555	-0.096			179.175	-0.476
	変形率			+0.04%		+0.05%				+0.26%
3	SKD11	179.595	179.670	+0.075	179.627	+0.032	179.582	-0.013	179.278	-0.317
	変形率			-0.04%		-0.02%		+0.01%		+0.18%

★変形率(%)は -は非球形化, +は球形化促進因子



金鋼は中央に向かって、直径が51μmMax 膨脹し、円弧の変形が起こる。逆に、長さは476μmMax も短くなり、楕円型の球形変形となった。

② これらの変形から次式を作り、表4のような球形化率を求めた。

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

球形化率に相違はあるが、合金鋼は熱処理によって球形変形を起こすことが認められた。

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。

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。

図9 繰返し焼入れに伴う長さの推移

表4 繰返し焼入れに伴う球形化の推移 (%)

合金鋼	焼入状況	JIS焼入 1035°C 180°C		2回焼入 1035°C		3回焼入 1050°C		過熱焼入 1125°C	
		直径	長さ	直径	長さ	直径	長さ	直径	長さ
SKD61	直径	0.08	0.14	0.13	0.26			0.17	0.33
	長さ	0.06		0.13		0.16			
SUS440A	直径	0.02	0.06	0.07	0.12			0.20	0.46
	長さ	0.04		0.05		0.26			
SKD11	直径	0.02	0.06	0	0.02	0.06	0.07	0.35	0.53
	長さ	0.04		0.02		0.01		0.18	