

冷間工具鋼の経年変化

中村 恵一^{*}, 横井 大円^{*2}, 辻井 信博^{*3}

Secular change of cold work tool steel
Keiichi Nakamura, Daien Yokoi and Nobuhiro Tsujii

Synopsis: Secular change of cold pressing dies in dimension is one of the most important problems in manufacturing process for precision products. In this paper, measurement of secular change in length for a year was carried out. The effects of heat treating conditions and die material properties on secular change were studied for two kinds of cold work tool steels, JIS SKD11 and 8% Cr steel, which are recently used for various purposes. Secular changes for a year of SKD11 and 8% Cr steel tempered at 480°C resulted in expansion of approximately 6μm and 13μm, respectively. It was clarified that this difference between two grades is attributable to the degree of easiness in the decomposition of retained austenite. Appropriate heat treatment could control secular change of 8% Cr steel to extremely low level, less than 2μm.

Key words: secular change; cold work tool steels; retained austenite; heat treatment.

1. 緒言

近年、自動車用部品や電子部品などの高性能、高精密化にともない、冷間プレス金型にはミクロンオーダーの厳しい寸法精度が要求されている。冷間プレス金型は、使用中の摩耗による寸法変化の他に、金型製作後にも長期にわたる使用期間中に経年変化を引き起こし、寸法変化を起こすことが知られている。この経年変化は、金型の焼入焼戻時に残留したオーステナイト（以下、 γ_R と記す）が、時間の経過とともに少しずつマルテンサイトに変態することにより生じると考えられている。経年変化を抑制するために、経験的にサブゼロ処理や高温焼戻処理¹⁾などを行うほか、 γ_R を残したままそれを安定化させ経年変化を抑制する方法も紹介されている²⁾。しかし、冷間工具鋼の経年変化について、系統的に研究した報告はほとんどなく、 γ_R の安定化についても、化学的安定化説³⁾、機械的安定化説⁴⁾、マルテンサイト/ γ_R 界面でのCの濃化による安定化説⁵⁾など種々の説が提案されているものの定説がないのが現状である。本報では、冷間工具鋼の経年変化の実態を把握することを目的として、2種の代表的な冷間工具鋼を用い、それらの経年変化量を31.6Ms（1年）間の長期にわたり測定し、経年変化に及ぼす熱処理条件と金型材質の影響について系統的な研究を行った。

2. 供試材および実験方法

2・1 供試材

本実験では供試材としてSKD11と、それを改良した8Cr系冷間工具鋼SKD11Mを用いた。それぞれの化学成分をTable 1に示す。SKD11Mの特徴はSKD11に比べ高靱性であるうえ、高温焼戻しにより高強度が得られる点である。

Table 1. Chemical compositions of materials used.

Grade	(mass%)					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
SKD11M	0.8	0.9	0.4	8.4	2.0	0.6
SKD11	1.5	0.2	0.4	11.6	0.8	0.2

2・2 実験方法

2・2・1 試験片および経年変化量測定方法

厚み25mm、幅105mmの圧延平角材から、機械加工により厚み21mm、幅101mm、長さ121mmの試験片を作製した。2・2・2に示す種々の熱処理を行った後、最大高さ3μmの仕上げ研磨を施した。仕上げ研磨から約0.6Ms（7日）毎に31.6Ms（1年）間にわたって、測定精度±0.5μmの測定ヘッドを有するダイヤルゲージにより、23±0.5°Cの恒温室内で試験片の経年変化量測定を行った。なお、熱処理終了

* 技術企画部技術開発室

*2 技術研究所特殊鋼研究室

*3 技術研究所特殊鋼研究室, 工博

から仕上げ研磨を経て経年変化量測定までに要した期間は約1.2Ms (14日)である。

2・2・2 熱処理条件

熱処理条件として焼戻温度、焼戻回数およびサブゼロ処理の影響について検討した。焼入れは全て真空炉にて行い、オーステナイト化温度1030℃で5.4ks保持後N₂ガス冷却した。焼戻温度を180℃、480℃、530℃および550℃とし、焼戻時間を14.4ks (但し180℃焼戻しの場合は3.6ks)、焼戻回数を2回および3回とした。また、サブゼロ処理温度を-70℃および-150℃とした。

2・2・3 γ_R 量測定と機械的性質

経年変化量測定に用いた試験片と同一チャンスで熱処理を行った試験片を用いて、X線回折法により γ_R 量を測定した。さらに、各熱処理を施した試験片について抗折試験、シャルピー衝撃試験および大越式摩耗試験を常温で行った。

3. 実験結果および考察

3・1 経年変化量に及ぼす焼戻温度の影響

Fig. 1にSKD11Mの経年変化量に及ぼす焼戻温度の影響を示す。グラフの横軸は仕上げ研磨終了からの期間、縦軸は圧延方向の経年変化量を示す。なお、幅方向および厚み方向の経年変化量測定を同時に行ったが、幅方向は圧延方向とはほぼ同一の挙動を示し、また、厚み方向はほとんど変化しなかったため、本報では圧延方向の経年変化量を代表して示すこととした。

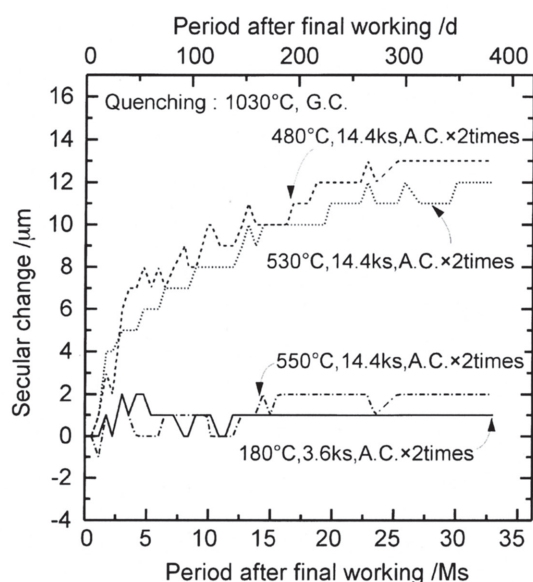


Fig.1. Effect of tempering temperature on secular change of SKD11M.

Fig. 1によると180℃および550℃焼戻材の経年変化量は、31.6Ms (1年)後においてもそれぞれ1 μ mおよび2 μ mであ

る。一方、480℃および530℃焼戻材の経年変化量は、6.0Ms (70日)までで急激に増加し、その後約31.6Ms (1年)ではほぼ飽和する。31.6Ms (1年)後の経年変化量はそれぞれ13 μ mおよび12 μ mであった。熱処理後に測定した γ_R 量と経年変化量についてまとめた結果をTable 2に示す。Table 2から明らかのように、熱処理後の γ_R の量そのものが単純に経年変化に影響しているとは考えられない。以下にこれら各焼戻温度での経年変化の挙動を考察する。

Table 2. Secular change after 31.6Ms and volume fraction of γ_R of SKD11M tempered at several temperatures after quenching.

Tempering temp.	Volume fraction of γ_R	Secular change after 31.6Ms
180℃	8%	1 μ m
480℃	4%	13 μ m
530℃	0%	12 μ m
550℃	0%	2 μ m

3・1・1 180℃焼戻材

180℃焼戻材では、マトリックスおよび γ_R 中に合金元素が多量に溶け込んでいる。特にオーステナイトを安定化するCを多量に含んでいることが γ_R の化学的安定化³⁾を助長していると考えられる。一方、C以外にCr、MoおよびVなどの元素も γ_R 中に固溶しており、この固溶強化が変態に対するせん断抵抗を大きくしていると考えられる(機械的安定化)⁴⁾。また、体積膨張した周りの剛性の高いマルテンサイトにより γ_R が拘束されていることも機械的安定性の一因と考えられる。以上の理由から180℃焼戻材は γ_R 量を8%程度含んでいるにもかかわらず経年変化量が小さいのは、 γ_R の安定性が高いためと推察される。しかしながら、本実験は常温で応力無負荷状態での結果であり、実鍛造にみられるような金型の昇温や応力負荷が存在する場合、どこまでこの安定性が保たれるかは今後の検討課題である。

3・1・2 480℃焼戻材

480℃焼戻材は180℃焼戻材より γ_R 量が少ないが、経年変化量は大きくなった。480℃は二次硬化を引き起こす炭化物が生成し始める温度域である。この温度域ではC、CrおよびMoが γ_R から排出されるため、 γ_R の化学的および機械的安定性は低減すると考えられる。この部分的に安定性の低下した γ_R が経年変化を引き起こしたと推察される。

3・1・3 530℃焼戻材

530℃焼戻材の場合、 γ_R 量は0%であるにもかかわらず31.6Ms (1年)後に12 μ mもの経年変化が生じた。SKD11においてもし1%の γ_R が存在した場合、全 γ_R のマルテンサイト変態による膨張量を計算すると、100mmの長さに対して数10 μ mの膨張が起こることになる。この計算結果やX線回折法による γ_R 量の測定誤差が2~3%程度であることも考慮すると、530℃焼戻材は実際には若干の γ_R を含んでいた可能性が十分考えられる。さらに530℃焼戻材では、C、Cr

およびMoはマトリックスおよび γ_R から排出されて炭化物を形成するため、 γ_R の化学的および機械的安定性は一層低減していると考えられる。また、マトリックスも剛性の高いマルテンサイトから剛性の低い焼戻マルテンサイトになるため、その γ_R に対する拘束力も低減する。したがって、530℃焼戻材の経年変化は、X線回折法では検出できないほどわずかで、かつ非常に不安定な γ_R がマルテンサイトに変態することにより生じたためと考えられる。

3・1・4 550℃焼戻材

焼戻温度が550℃では、 γ_R はほぼ完全に分解しているため経年変化が少なかったと推察される。なお、高温焼戻しにおいてもラス間の境界にフィルム状の γ_R が残存していることが指摘⁴⁾されているが、このフィルム状の γ_R は非常に安定化しており経年変化への影響は少ないと考えられる。

3・2 経年変化量に及ぼす焼戻回数および3回目の焼戻温度の影響

Fig.2に530℃で2回焼戻した後、3回目の焼戻温度の影響について検討した結果を示す。2回焼戻材の経年変化量は18.1Ms (210日) 後にほぼ飽和し、最大12 μm であるのに対し、180℃、480℃および530℃の3回焼戻材の経年変化量は、12.1Ms (140日) 後にはほぼ飽和し2回焼戻材の半分の6 μm 程度である。3回目の焼戻温度が480℃および530℃の場合、 γ_R の分解が促進され、部分的に存在する不安定な γ_R 量が減少したことが経年変化が半減した原因と推察される。一方、3回目を180℃で焼戻した場合、 γ_R の分解よりも安定化が促進されたことが考えられる。しかし、いずれの条件においても4~6 μm の経年変化が生じており、不安定な γ_R はまだ存在していることが分かる。

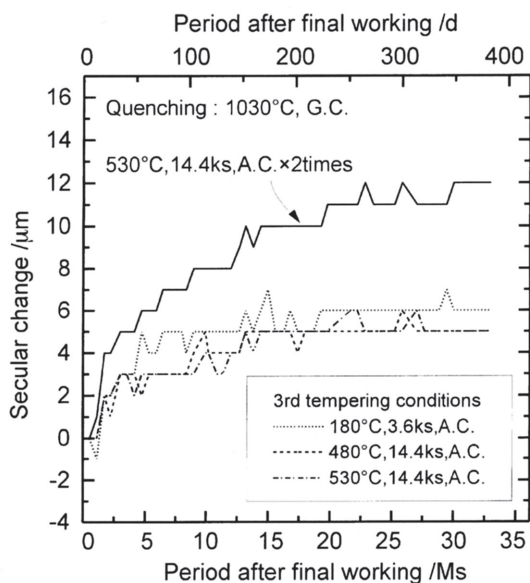


Fig.2. Effect of 3rd tempering temperature after tempering at 530℃×2times on secular change of SKD11M.

3・3 経年変化量に及ぼすサブゼロ処理の影響

経年変化を抑制するために、 γ_R を分解させる方法としてサブゼロ処理がある¹⁾。通常サブゼロ処理はドライアイスを使用し-100℃以上の温度で行われるが、近年、液体窒素の使用により-130℃以下に冷却する超サブゼロ処理が注目されている⁹⁾。Fig.3にSKD11Mの経年変化量に及ぼすサブゼロ処理の影響を示す。通常サブゼロ処理を-70℃、超サブゼロ処理を-150℃で行った。また、焼戻温度をFig.1の結果より最も経年変化量が大きかった480℃とした。

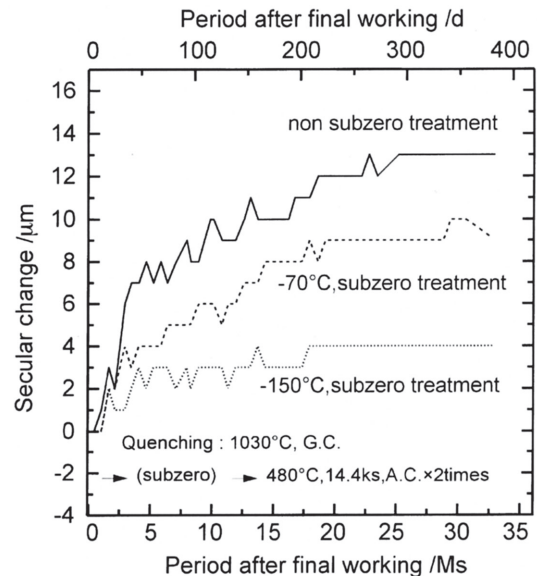


Fig.3. Effect of subzero treatment on secular change of SKD11M.

非サブゼロ処理材の経年変化量は、6.0Ms (70日) まで急激に増加するが、通常サブゼロ処理を行うことにより急激な増加は抑制される。しかし、通常サブゼロ処理を行っても31.6Ms (1年) で10 μm の経年変化が生じる。一方、-150℃超サブゼロ処理を行うと通常サブゼロ処理に比べ経年変化が抑制され低位安定となるが、安定した時点での経年変化量は4 μm であり、完全に経年変化を抑制することはできない。なお、非サブゼロ処理材の焼戻後の γ_R 量は4%、通常サブゼロ処理材および超サブゼロ処理材のそれはともに2%であった。サブゼロ処理を行うことによる経年変化量の低減は γ_R 量の減少が一因であるが、通常サブゼロ処理材および超サブゼロ処理材の γ_R 量が同じであるにもかかわらず経年変化の挙動が異なるのは、 γ_R の量だけではなくその安定化度も影響していると考えられる。

3・4 経年変化量に及ぼす鋼種の影響

Fig.4にSKD11MとSKD11の31.6Ms (1年) 後の経年変化量に及ぼす焼戻温度の影響を示す。両鋼種とも焼戻温度が480℃で経年変化量が最大となり、経年変化量に及ぼす焼戻温度の影響は両鋼種で同じ傾向を示す。しかし、480℃および530℃焼戻材の経年変化量はSKD11Mに比べSKD11の方が小さい。この原因の一つとして両鋼種の γ_R の分解の

し易さの違いが考えられる。Fig.5にSKD11MとSKD11の焼戻温度と硬さおよび γ_R 量との関係を示す。SKD11では400℃からすでに γ_R の分解が開始するのに対し、SKD11Mの γ_R はより高い500℃から分解しはじめる。これはSKD11に比べSKD11Mにおいてより多く析出するMoおよびV炭化物の析出温度が高いためである。また、もう一つの原因として炭化物の分布形態の違いも考えられる。Fig.6に示すように、SKD11にはSKD11Mに比べ巨大な共晶一次炭化物が多く圧延方向に連なっており、これら炭化物も経年変化の減少に貢献しているかもしれない。

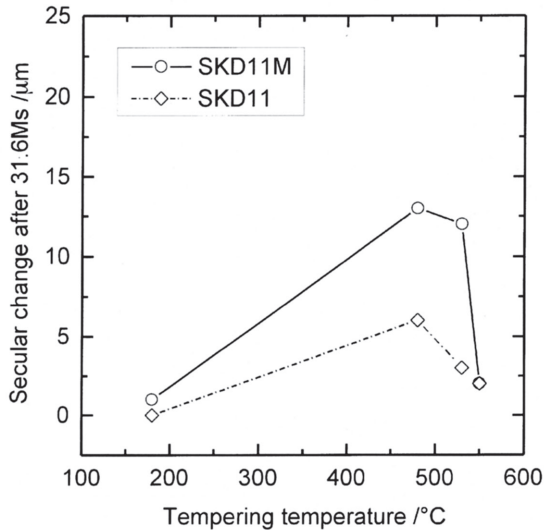


Fig.4. Relationship between tempering temperature and secular change after 31.6Ms.

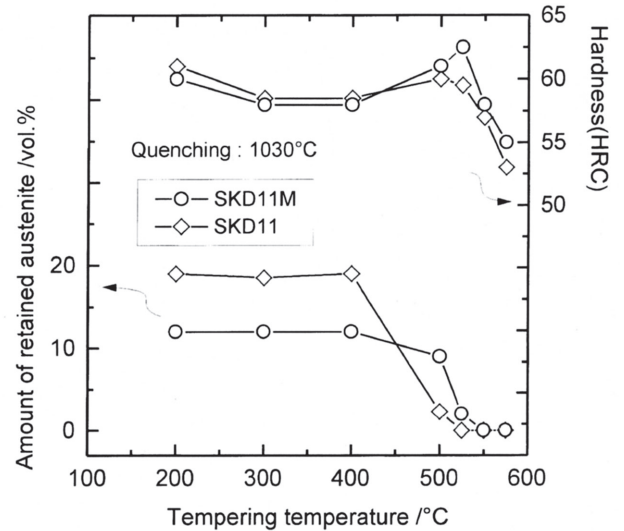


Fig.5. Effect of tempering temperature on the amount of retained austenite and tempering hardness.

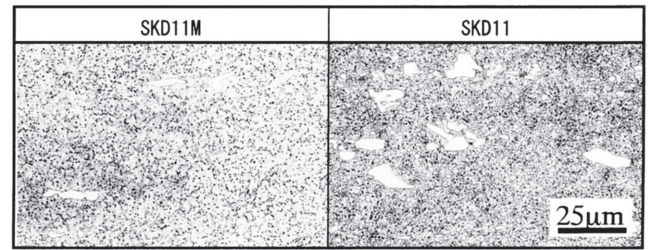


Fig.6. Optical micrographs of SKD11M and SKD11.

Table 3. Mechanical properties of SKD11 and SKD11M.

		Tempered at 180°C	Tempered at 530°C	Subzero treatment at -70°C → tempered at 530°C	Subzero treatment at -150°C → tempered at 530°C
Hardness (HRC)	SKD11	61.5	54.0	52.3	58.4
	SKD11M	59.5	59.9	61.5	59.3
Bending strength (N/mm ²)	SKD11	3463	3791	3709	3876
	SKD11M	4547	5035	5042	5148
Deflection (mm)	SKD11	0.87	0.65	0.69	0.57
	SKD11M	0.86	0.88	0.85	0.94
Impact value (J/cm ²)	SKD11	26.6	24.8	26.3	18.1
	SKD11M	65.4	43.7	35.1	46.5
Specific amount of wear, ×10 ⁻⁸ (mm ³ /N-mm)	Measured at velocity of friction of 1.14(m/sec)				
	SKD11	1.12	1.48	1.32	0.98
	SKD11M	1.37	1.43	1.16	0.93

3・5 機械的性質

精密金型の型材選定および設計にあたり、経年変化を抑制させる熱処理条件も重要であるが、その熱処理に伴う機械的性質も重要である。そこで経年変化測定用試験片と同一寸法で同一熱処理を行ったSKD11MとSKD11について機械的性質を調査した。その結果をTable 3に示す。SKD11Mは180℃焼戻しを除き、全ての焼戻条件でSKD11に比べ高い硬さが得られた。

またSKD11Mの抗折強度は全条件でSKD11の約1.3倍で、かつ靱性の指標となるたわみ量も高位にある。これはシャルピー衝撃値にも現れており、SKD11Mのシャルピー衝撃値はSKD11の2~3倍を有している。一方、耐摩耗性は両鋼種ともほぼ同水準であり、両鋼種ともサブゼロ処理無し、-70℃サブゼロ、-150℃超サブゼロの順に耐摩耗性が向上していることが分かる。これは、サブゼロ処理が γ_R のマルテンサイト化と組織の均一微細化に寄与したためと考えられる⁹⁾。

3・6 経年変化を抑制する最適熱処理条件

本実験結果からSKD11Mの経年変化量を抑制できる最適熱処理条件を、強度と熱処理性の実用性を考慮して、Table 4にまとめた。

処理Aは簡易熱処理であり、所要硬さが58~60HRCである場合は180~300℃低温焼戻し（2回繰返し）が推奨される。処理Bおよび処理CはPVD等の表面処理に対応できる条件である。処理Bは高硬さを重視した条件であり、-110~-150℃超サブゼロ処理後420~500℃焼戻し（2回繰返し）により達成できる。処理Cはサブゼロ処理を不要とする480~520℃高温焼戻し（3回繰返し）である。

上記A~Cの熱処理を実際に行った場合の経年変化量をFig.7に示す。31.6Ms（1年）後の経年変化量は $\pm 2\mu\text{m}$ 以下と低く安定することが確認できた。

Table 4. The best condition of heat treatment for suppression of secular change of SKD11M.

Treatment	A	B	C
Hardness	58~60HRC	59~62HRC	55~59HRC
Tempering conditions	・ 180~300℃ × 2times	・ -110~-150℃ subzero → 420~500℃ × 2times	・ 480~520℃ × 3times ・ 540℃ × 2times
Secular change	under 2 μm	under 2 μm	under 2 μm
Material characteristic	ease for heat treatment	apply to surface treatment higher hardness	needless for subzero cooling lower hardness

Quenching : 1030℃, G.C.

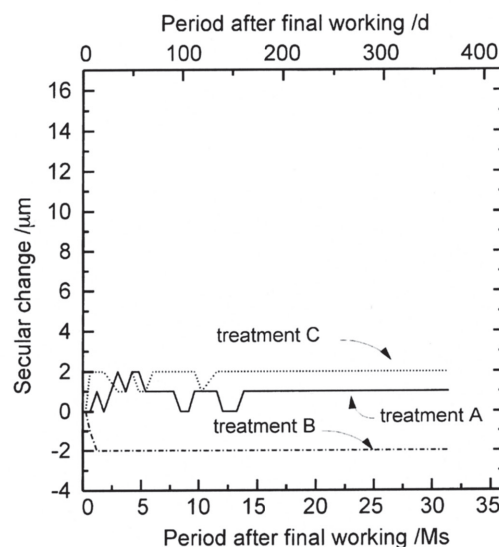


Fig.7. Secular change of SKD11M heat treated with the best condition.

4. 結論

31.6Ms (1年)間の長期にわたり冷間工具鋼の経年変化量を測定し、経年変化に及ぼす熱処理条件の影響について系統的な研究を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 厚み21mm, 幅101mm, 長さ121mmの試験片の場合, SKD11Mにおいて通常行っている530℃高温焼戻(2回繰返し)材には, 長さ方向に31.6Ms (1年)間で $12\mu\text{m}$ の経年変化が生じる。
- (2) 冷間工具鋼の経年変化は, 焼入焼戻時の γ_R の量およびその安定化度により決定される。
- (3) 経年変化挙動は同じ熱処理を行っても鋼種によって大きく異なる。これは鋼種間の γ_R の分解のし易さの違いによる。
- (4) SKD11Mに最適な熱処理を施すことにより, その経年変化量を $2\mu\text{m}$ 以下に抑制することが可能である。

文献

- 1) 田村今男, 泉久司, 伊佐重輝: 鉄鋼材料学, (1989), p.48 [朝倉書店]
- 2) 大木武博: 金属プレス, 25 (1993), 6, p.72
- 3) 須藤一, 田村今男, 西澤泰二: 金属組織学, (1972), p.182 [丸善]
- 4) 牧正志, 田村今男: 鉄と鋼, 67 (1981), p.854
- 5) 泉山昌夫: 日本金属学会誌, 25 (1961), p.799
- 6) 須藤一, 山形健男: 日本金属学会誌, 34 (1970), p.968
- 7) 松田明教: 日本金属学会誌, 36 (1972), p.787
- 8) Peter Haasen著, 岸輝雄ら訳: ハーゼン金属強度の物理学, (1981), p.271 [アグネ]
- 9) 大和久重雄: 金型の熱処理ノート, (1991), p.61 [日刊工業新聞社]

