

低合金鋼の高温強度におよぼす改良 オースフォームの影響

大森宮次郎*

(昭和60年9月5日受理)

Effect of Modified Ausforming on High Temperature Strength of Low Alloy Steel

Miyajiro OHMORI*

Abstract — Ni-Cr and Ni-Cr-Mo machine structural steels were rolled at temperature range from 880°C to 750°C and transformed immediately into martensite by oil-quenching. The high temperature hardness of the martensite was compared with that of the conventionally quenched one in the temperature range from 50°C to 700°C. High temperature tension test was also carried out at temperatures from 400°C to 700°C, using specimens tempered at 600°C for 1 hour.

Modified-ausformed steels maintain higher hardness than the conventionally quenched ones at the temperature of 400°C or 500°C or below. It means that the modified-ausforming effect remains up to the temperature.

The following expression is valid between the hardness Hv and the temperature T;

$$Hv = H_0 \exp(Q/RT)$$

where H_0 is pre-exponential term, Q apparent activation energy and R gas constant. The relation between $\ln Hv$ and $1/T$, derived above expression, is, however, separated into three straight lines having respective slopes.

The modified-ausformed specimens also have higher ultimate tensile strengths and lower elongations than the conventionally heat-treated ones at the test temperature of 500°C or below. Modified-ausforming, however, contributes much to remarkable improvement in the elongation at the temperature of 600°C or above rather than strengthening effect.

1. 緒 言

ばね鋼や機械構造用合金鋼などの低合金鋼は、改良オースフォームによって延性や衝撃値をほとんど悪化させずに、強度を増すことが¹⁾き²⁾る。このため、これらの鋼は、改良オースフォームによってより強じんな特性をもつことになる。この強じん化は、改良オースフォー

ムによってマルテンサイトが強化し、しかも高温焼もどしに対しても軟化しにくい特性によってえられ³⁾る。このような改良オースフォーム鋼の軟化しにくい特性は、高温における強度特性の向上につながることを期待される。

本研究では、改良オースフォーム処理した低合金鋼マルテンサイトの高温硬さ測定および焼もどしを行った試片による高温引張試験を行ない、改良オースフォーム処理の高温強度への効果を検討する。

* 茨城大学工学部機械工学第二学科（日立市中成沢町）

Department of Mechanical Engineering II, Faculty of Engineering, Ibaraki University,
Hitachi 316, Japan

850°Cで1時間焼なましを行なった。

2. 実験材料および実験方法

2.1 実験材料

機械構造用合金鋼のNi - Cr 鋼 (SNC 631) および Ni - Cr - Mo 鋼 (SNC M439) を実験に使用した。その化学組成をTable 1に示す。

これらは市販の棒鋼 (直径32mm) であり、さらに温度 900°Cで圧延して所要の厚さとした。熱間圧延後、温度

Table 1 Chemical compositions of the steels used (wt. %).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SNC631	0.27	0.22	0.52	0.028	0.015	2.84	0.85	—	0.13
SNCM439	0.38	0.27	0.70	0.012	0.011	1.70	0.76	0.20	0.12

2.2 改良オースフォーム処理

上述の焼なましを行なった鋼片を温度 880°Cに30分間

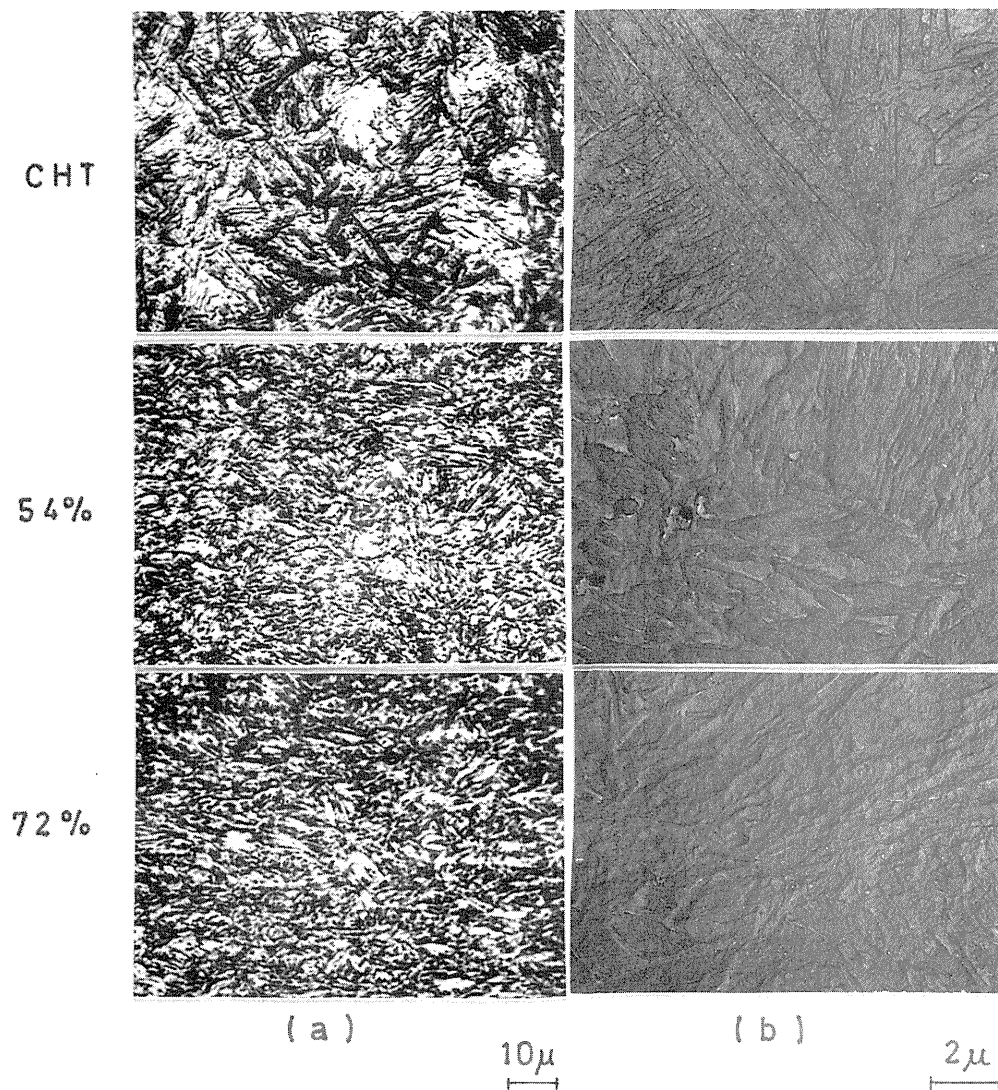


Fig. 1 Photomicrographs of martensite in hardness test specimen. (a) Optical micrographs (b) Carbon replica micrographs. Steel; SNC631.

加熱後、圧延加工を行ない、ただちに油焼入れして改良オースフォーム処理を行なった。

硬さ試片は、全加工度54%または72%としたが、これらはそれぞれ3および4パスで連続して圧延加工した。最終厚さは、約6mmである。

引張試片は、厚さ5mm、試験部幅6mmの板状引張試片にあらかじめ機械加工しておいたものを2パスで圧延し、全加工度51%を達成した。

圧延は、ロール直径150mm、ロール周速10m/min（無負荷）の2段式圧延機を用いて行なった。

なお、比較を行なう目的で通常の焼入れを行なった試片（加工度0%）も準備した。

2.3 試験片

硬さ試片は、焼入れ状態のマルテンサイト組織のものを砥石切断により寸法 $5 \times 5 \times 10$ mmの直方体とした。硬さ測定面は圧延面であり、耐水研摩紙およびパフを用いて鏡面仕上げを行なった。

引張試片は、温度600°Cで1時間の焼もどしを施した後、機械加工および研削仕上げを行なった。引張試片は板状で、寸法は、厚さ2mm、試験部幅6mm、標点距離20mm、つかみ部幅16mmである。

2.4 試験方法

2.4.1 高温硬さ試験

高温硬さ測定には、高温硬さ試験機（日本光学HT-5型）を用いた。測定条件は次の通りである。

- 測定面：圧延面
- 測定温度：50～700°C
- 雰囲気：真空（ 2×10^{-4} mmHg 以下）
- 温度上昇後、くぼみ圧印までの時間：10_{min}
- 圧子：サファイア
- 試験荷重：500gr
- 荷重保持時間：30sec
- 圧子予熱時間：5 min
- 測定点数：5点
- 熱電対：C. A, 0.3 mm ϕ

同一条件で5点測定し、その平均値で硬さを代表した。

2.4.2 高温引張試験

試験には高温炉（反射炉）を設置した新興通信TOM-5000型材料試験機を使用した。試験温度は、400、500、600°Cおよび700°Cの4種類であり、その温度に到達して10分後に試験を開始した。試験は、同一条件で

2回繰返した。

3. 実験結果と検討

3.1 高温硬さの挙動

Fig. 1は、硬さ試験前の試片のマルテンサイト組織であり、Ni-Cr鋼の例である。改良オースフォーム処理における加工度の大きい試片ほどマルテンサイト組織が細粒となることがわかる。電顕組織にみられるように、改良オースフォームした試片のマルテンサイトは、ラス幅および長さともに非常に小さくなっている。Ni-Cr-Mo鋼の場合も同様の傾向を示した。

次に、このマルテンサイトの硬さにおよぼす試験温度の影響をFig. 2および3に示す。Ni-Cr鋼の場合、試験温度500°Cまでは、改良オースフォーム処理されたマルテンサイトは、通常熱処理材（CHTと記してある）に比べて高い硬さを維持する。この場合、加工度の大きい試片ほど硬さが高い、温度600°C以上では、改良オースフォームおよび通常熱処理材間に硬さの相違がみられなくなる。しかるにNi-Cr-Mo鋼は、改良オースフォーム材が、通常処理材より高い硬さを維持するのは、試験温

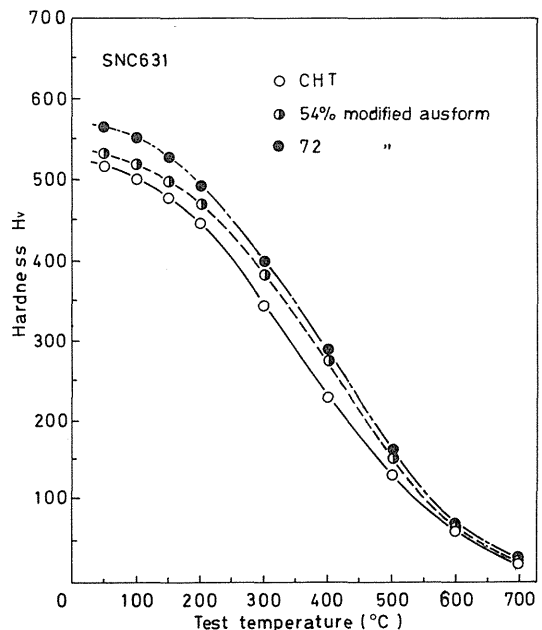


Fig. 2 Comparison of hardness at elevated temperature between modified-ausformed martensite and conventionally quenched one in steel SNC631.

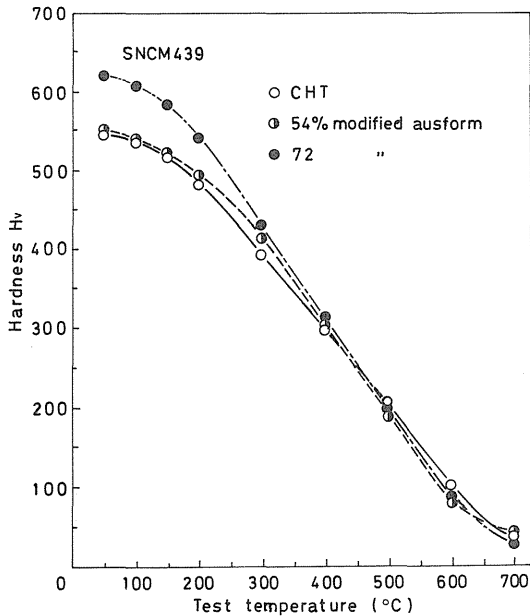


Fig. 3 Comparison of hardness at elevated temperature between modified-ausformed martensite and conventionally quenched one in steel SNCM439.

度 400°C 以下の範囲であり、500°C 以上では逆に改良オースフォーム材の方が硬さが低くなる場合さえ起る。また、加工度 54% の試片では、硬さ増加がえられる場合にも、その値は常に小さい。

改良オースフォーム処理されたマルテンサイトは、上述の温 600°C あるいは 700°C という高温で焼もどしを施した場合にも、室温で測定した硬さは、同じ条件で焼もどした通常熱処理材よりも高く、また引張強さ等も高¹⁾い。しかし、上述のように温度 500°C または 600°C 以上での高温硬さは、改良オースフォーム処理材が必ずしも高くないで、同等か、低くなる場合さえある。本研究のように、マルテンサイトの焼もどし過程中的硬さは、マルテンサイト中のひずみ硬化の回復や炭化物の析出を起しつつある段階の押し込み変形であり、また空孔や原子の拡散も容易である場合に対応する硬さであり、拡散をほとんど伴わない室温での硬さと様子が異なっている。すなわち、改良オースフォーム処理材の場合、焼もどし後の subgrain の細粒化、炭化物の微細分散は、室温では明らかに強化因子となるが、高温で、しかも圧子の押し込み応力が存在する場合、これらの組織因子は、必ずしも強化因子にならない場合があるものと思われる。結晶の細粒化が、クリープ強度を高める作用とそうでない場

合が⁴⁾あるのと類似現象かも知れない。

3.2 温度と硬さの関係の検討

すべりがおもな変形機構である場合、硬さ H_v と変形応力 σ_f の間に次の関係のある⁵⁾ことが知られている。

$$H_v = C_1 \sigma_f \quad (1)$$

ただし C_1 は定数である。また、変形応力 σ_f 、温度 T (°K) およびひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の間には次の関係があ⁶⁾る。

$$\sigma_f = C_2 \dot{\epsilon}^m \exp(Q/RT) \quad (2)$$

ただし C_2 および m は定数、 R は気体定数、 Q は見かけの活性化エネルギーである。式(1)と(2)より

$$H_v = C_1 C_2 \dot{\epsilon}^m \exp(Q/RT)$$

となるが、通常の硬さ試験では $\dot{\epsilon}$ を変化させないから、上式で $C_1 C_2 \dot{\epsilon}^m$ を前指数項 H_0 としてまとめると次のように表わされる。

$$H_v = H_0 \exp(Q/RT) \quad (4)$$

これより $\ln H_v$ と $1/T$ の間に直線関係が存在しなけ

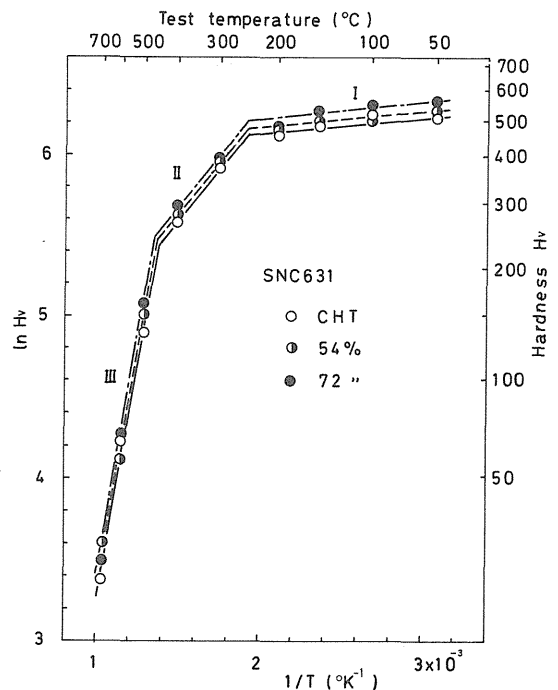


Fig. 4 Relation between natural logarithm of hardness $\ln H_v$ and reciprocal temperature $1/T$ for steel SNC 631.

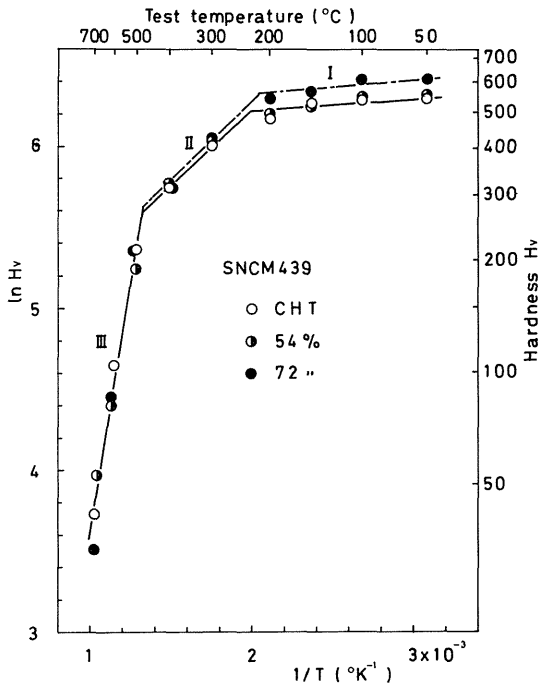


Fig. 5 Relation between natural logarithm of hardness $\ln H_v$ and reciprocal temperature $1/T$ for steel SNCM 439.

ればならない。前述の実験結果を $\ln H_v$ と $1/T$ の関係で描くと Fig. 4 および 5 を得る。 $\ln H_v$ と $1/T$ の関係は、全試験温度範囲で 1 本の直線とならず、勾配の異なる 3 本の直線に分かれる。3 本の直線を温度の低い ($1/T$ の高い) 方から順に図に示すように I, II および III 直線と呼ぶことにする。直線 I と II は、試験温度 200 ~ 300°C の間で交差し、また直線 II と III は、温度 400 ~ 500°C の間で交差する。このことから、直線 I は、マルテンサイトの焼もどしの第 1, 第 2 段階、直線 II は焼もどしの第 3 段階、また直線 III は、焼もどしの第 4 段階に対応するようと思われる⁷⁾。

圧子押込みに関するものと解釈できる見かけの活性化エネルギー Q の値を概算すると、両鋼に対して大きな相違はみられず、直線 I より $Q \doteq 0.2 \text{ kcal/mol}$, 直線 II より $Q \doteq 2.0 \sim 2.6 \text{ kcal/mol}$, また直線 III より $Q \doteq 12.0 \sim 13.0 \text{ kcal/mol}$ がえられる。 α 鉄中の炭素拡散の活性化エネルギーは、約 20 kcal/mol ⁸⁾ であるから、直線 I, II および III に対する活性化エネルギーは、それぞれ α 鉄中の炭素拡散の活性化エネルギーの約 $1/100$, $1/10$ および約 $3/5$ に相当する。また、 α 鉄中の自己拡散の活性化エネルギー約 58 kcal/mol ⁹⁾ に対し、直線 III からの活性

化エネルギー Q は約 $1/5$ である。マルテンサイトの焼もどし反応が、(i)炭化物の析出過程と(ii)母相のひずみ硬化の回復過程の複合現象であるから、本実験における高温硬さは、マルテンサイトの焼もどし分解過程における押込み変形抵抗を表わすことになる。一般に、高温変形における活性化エネルギーは、自己拡散の活性化エネルギーにほぼ等しいことが示され、たとえばクリープ変形等は、元素の自己拡散によって律速されることが示されている¹⁰⁾。本実験の場合、直線 I, II, III に対応する活性化エネルギーが、 α Fe 中の炭素拡散の活性化エネルギーよりはるかに小さいので、炭素の拡散が高温硬さの支配因子となり得ないことがわかる。しかし、高温硬さから得られる活性化エネルギーが非常に小さいことは、マルテンサイトが加熱によって容易に分解することを示唆している。

なお、図からわかるように、通常熱処理材と改良オースフォーム材の直線 I ~ III は、ほぼ平行かまたは重なっており、このことは、改良オースフォームによって見かけの活性化エネルギー Q が変化しないことを意味する。試験温度 400°C または 500°C 以下で改良オースフォーム処理材がより高い硬さを維持するのは、前指数項 H_0 の変化によるものとみられる。しかし、本実験結果からは、

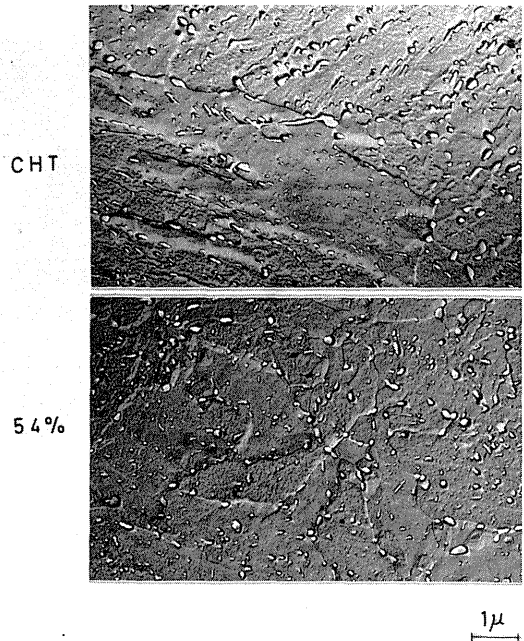


Fig. 6 Carbon replica photomicrographs of tension test pieces after tempering at 600°C for an hour. Steel; SNC631.

H_0 への改良オースフォームの効果を議論することは不可能である。

3.3 高温引張特性

Fig. 6は、高温引張試験前の試片の焼もどし組織である。通常熱処理材は、この焼もどし条件でもマルテンサイトの形態が残存し、ポケット境界等には大きな炭化物が析出する。しかるに、ポケット内では小さな炭化物の析出が観察される。改良オースフォーム処理材は、この焼もどし条件ではマルテンサイト形態はも早や観察されず、小さな多角形の subgrain となっている。その粒内および境界に微細な炭化物が析出する。

このような組織をもつ試片の高温引張試験結果をFig. 7に示す。両鋼とも試験温度500°Cまでは、改良オース

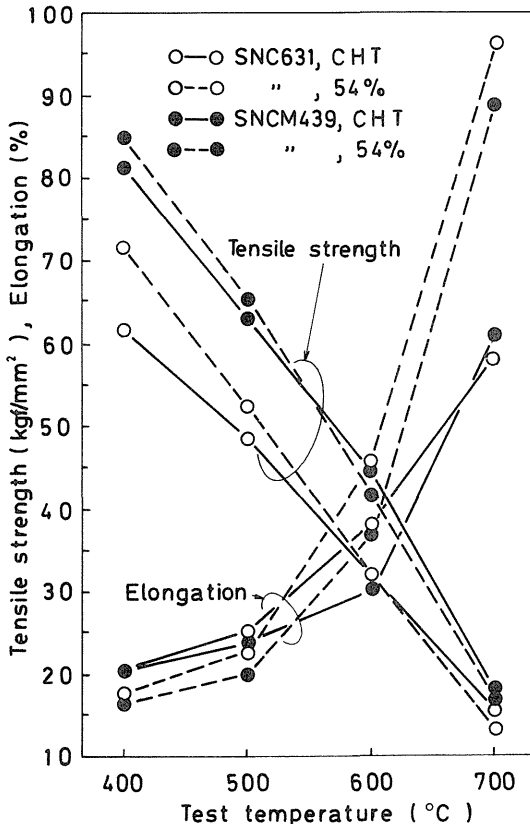


Fig. 7 Mechanical properties at elevated temperature.

フォーム処理材の方が、高い引張強度を示し、改良オースフォーム効果が維持される。しかるに試験温度600°C以上では、改良オースフォーム材の引張強度が、通常熱処

理材のものと同様か、または幾分下回る結果を示し、改良オースフォーム効果が消滅する。この傾向は、高温硬さの挙動と類似する。伸びは、試験温度500°C以下では、改良オースフォーム材の方が低いが、改良オースフォーム効果が失われる温度600°C以上では、改良オースフォーム処理材に大きな伸びが生ずる。試験温度700°Cでは、通常熱処理材の伸びが約60%前後であるのに対し、改良オースフォーム材は、90~97%なる大きな伸び値を示す。この大きな延性は、マルテンサイトの細粒化、焼もどし後のsubgrainの微細化等によって起る1種の結晶細粒化超塑性現象¹⁾と見なすことができよう。

4. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

1. 改良オースフォーム処理されたマルテンサイトは、温度400°Cまたは500°C以下の範囲では高い硬さを維持するが、温度600°C以上で改良オースフォームの効果が消滅する。
2. 硬さ H_v 、温度 T とすると、 $\ln H_v - 1/T$ は、試験温度50~700°Cの範囲で3本の勾配の異なる直線となり、硬さ H_v と温度 T の間に次式の成立が確かめられた。

$$H_v = H_0 \exp(Q/RT)$$

勾配の異なる3本の直線は、焼もどしの各段階に対応することが推測された。

3. 高渦における引張強さは、温度500°C以下では改良オースフォーム材の方が高く、温度600°C以上で改良オースフォームの強化効果が失われる。また、伸びは、温度500°C以下の範囲で改良オースフォーム材の方が通常熱処理材より低いが、温度600°C以上で改良オースフォーム処理材に大きな延性があらわれる。

参 考 文 献

- 1) 大森, 川又, 機論, 43-371(昭52-7), 2404.
- 2) 大森, 熱処理, 17-3(昭52-6), 138.
- 3) 大森, 田名部, 黒木, 材料, 21-226(昭47-7), 665.
- 4) 細井, 鉄と鋼, 48(昭37), 1487.
- 5) たとえばR. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", (1950), 鷺津, 山田, 工藤訳, "塑性学" 初版, 培風館, (昭39), 256.
- 6) たとえば, 鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会, "鉄

- 鋼の高温変形挙動”，(昭54)，5.
- 7) たとえば，上原，電気製鋼，40-1(昭44-1)，45.
- 8) たとえば，平野訳，“鉄鋼物性工学入門”，初版，共立，(昭43)，287.
- 9) 同上 p. 284.
- 10) 文献6) のp. 19.
- 11) 鳥阪，白井，中沢，宮川，鉄と鋼，71-6(昭59-6)，735.