

青熱脆性を考慮した広い温度域に適用可能な炭素鋼の構成式*

立矢 宏^{*1}, 新本 哲平^{*2}, 高木 幸司^{*3}
放生 明廣^{*1}, 茶谷 明義^{*1}Temperature Dependent Constitutive Equation for Carbon Steels
with Consideration of Blue BrittlenessHiroshi TACHIYA^{*4}, Teppei ARAMOTO, Kouji TAKAGI,
Akihiro HOJO and Akiyoshi CHATANI^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University,
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667 Japan

This paper presents a temperature dependent static constitutive equation for carbon steels, which can be applied for wide temperature range involving the range where blue brittleness occurs. Generally, a stress induced in steel at a certain strain decreases with the temperature. However, the occurrence of blue brittleness of steels increases the values of work hardening. As a result, the stresses increase with the temperature due to the blue brittleness. Thus, the stress-strain relationships of steels seemingly have negative dependence to the temperature within the range involving the blue brittleness. Since this phenomenon arises remarkably at static strain-rate, the present paper has proposed a temperature dependent static constitutive equation. Concretely, the paper decomposes the stress-strain relation of steels into an unaffected part and affected part by the blue brittleness, and derives equations revealing those parts respectively. The proposed constitutive equation is expressed by the sum of them. The paper actually obtains unknown material constants involved in the proposed equations by a nonlinear least squares from measured results and confirms the appropriateness of the proposed constitutive equation over the wide temperature range.

Key Words: Constitutive Equation, Temperature Dependence, Blue Brittleness, Elevated Temperature, Carbon Steels, Stress-plastic Strain Curve

1. 諸言

材料の変形挙動は、ひずみ速度および温度に依存することが多く、一般に変形応力がひずみ速度の上昇に伴い増加し、温度の上昇に伴い低下する。これら材料の弾塑性変形挙動を構成式として表すことは、材料そのものだけでなく、構造の変形解析や、塑性加工時の加工パラメータの決定などのために重要である⁽¹⁾。

そこで、これまでに、転位の運動力学的考察に基づく構成式がいくつか考案されている^{(2)~(4)}。著者らも、先に温度およびひずみ速度依存性を考慮した動的構成式を提案するとともに、式中の材料定数の決定方法を示した⁽⁵⁾。また、実際にSS400炭素鋼を対象として構成式を決定し、広いひずみ速度範囲および温度域で、その変形挙動をよく表すことを確認した⁽⁶⁾。しかし、同構成式は適用可能な範囲として、常温から青熱脆性が生じない温度までを対象とした。

多くの延性金属は、ある温度域で変形能の低下を生じる⁽⁶⁾。本論文で対象とする炭素鋼においても、静的な荷重に対して約500~600Kで引張強さが上昇し、伸びと絞りも低下することが知られており、青熱脆性と呼ばれている⁽⁷⁾。青熱脆性は、炭素鋼に含まれる溶質原子

C, Nが転位を固着し、粘性抵抗として作用するために起こるもので、ひずみ時効のひとつであると考えられている⁽⁸⁾。青熱脆性の影響は、変形速度の比較的遅い領域において顕著に現れ、変形速度の増加に伴い、その出現温度域は高温側に移行し、影響が小さくなる⁽⁹⁾ことが知られている⁽⁷⁾。

上述のように、炭素鋼の変形応力は、通常、温度の上昇に対して低下するが、青熱脆性が生じた場合、変形応力は増加傾向を示す。したがって、見かけ上は、ある温度域に達すると、それまでとは逆の温度依存性を示すことになる。このような影響は、先に提案した構成式⁽⁶⁾では表すことはできず、また、他にも青熱脆性を考慮した構成式はほとんど見あたらない。しかし、上述のように、特に静的なひずみ速度域では青熱脆性による影響は大きく、高温下における材料および構造の変形現象の予測および解析を行うためにも、その影響を考慮した構成式の確立が望まれる。

そこで、本論文ではSS400およびS45C炭素鋼を対象とし、青熱脆性域を含む広い温度域で適用可能である静的応力-塑性ひずみ関係を表す構成式を提案する。

2. 試験方法および結果

2.1 試験方法 はじめに、SS400炭素鋼を試験片として行った高温下における一軸負荷静的圧縮試験⁽⁹⁾の結果を用いて、その変形挙動の温度依存性を示す。

* 原稿受付 2004年2月20日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部(〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)。^{*2} 学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科。^{*3} 金沢大学大学院自然科学研究科。

E-mail: tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

高温下における静的圧縮試験⁽⁹⁾には、万能試験機(島津社製 AG-10TD)を使用した。試験片は、SS400炭素鋼納入材に、両端面が試験片長手方向に対して直角となるよう研削仕上げを施した、長さ10mm、直径9mmの円柱とした。その化学組成を表1に示す。なお、試験時には試験片両端に二硫化モリブデンを塗布して摩擦の軽減をはかるとともに、圧縮後の試験片の形状を観察し、変形がほぼ一様であることを確認した。

試験片に生じる応力値は、試験機付属のロードセルで測定した。試験片のひずみは、試験片にひずみゲージなどを直接貼付できないため、最小分解能が $0.8\mu\text{m}$ である非接触変位測定器を用い、上下圧縮台座の変位量を測定し、双方の差より算出した。ただし、試験片長が短いことから、弾性域の変形量が小さく、非接触変位測定器で試験片の初期の弾性変形分に相当する微小なひずみを測定することは困難であった。そこで、測定値の記録対象を降伏点近傍以降とした。なお、降伏点は、万能試験機による試験片の圧縮が低速で、かつ、ほぼ一定速度であるとみなし、応力値の時間に対する変化率が急激に減少する箇所として仮定するとともに、同点近傍においてひずみに対する応力値の変化も急激に減少することを確認して決定した⁽⁹⁾。

試験片の温度は、静的圧縮を行う長時間にわたり一定に保たなければならない。そこで、セラミックファイバースリーブで絶縁した市販のニクロム線を試験片に直接巻きつけて加熱し保温した。試験片の温度は熱電対で測定するとともに、温度調節器を用いて、ニクロム線による加熱量を制御し温度を一定に保った。試験片圧縮部の概略を図1に示す。

2.2 試験結果 上述の方法により、常温(293K)から373Kまでは40Kごと、それ以後673Kまでは50Kごとに、計9種類の温度下で試験を行った。なお、試験速度は、試験片に生じる塑性ひずみ速度が 10^{-4}s^{-1} 程度となるように調整した。静的試験より得た293, 473, 573および673KにおけるSS400炭素鋼の静的応力-塑性ひずみ関係を図2に示す。なお、本論文で対象とするひずみは数%程度と小さく、塑性域のみを考慮することから、応力およびひずみは公称値を用いることとする。

図2より常温と473Kの結果を比較すれば、塑性ひずみに対する応力値が温度とともに減少することがわかる。しかし、573Kにおいて、塑性ひずみに対する応力値は、473Kの結果に比べ顕著な増加傾向を示し、さらに、673Kの結果では、また、減少することがわかる。このような傾向を詳細に検討するため、図3に塑性ひずみが3%である時の静的応力と温度の関係を Δ で表す。図3より、常温から温度が上昇するにつれ、応力値が減少

Table 1 Chemical composition of SS400 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.10	0.20	0.50	0.022	0.028

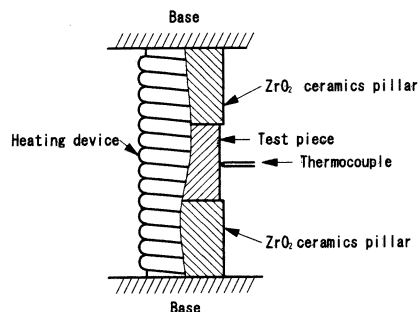


Fig.1 Schematic of the static compression test

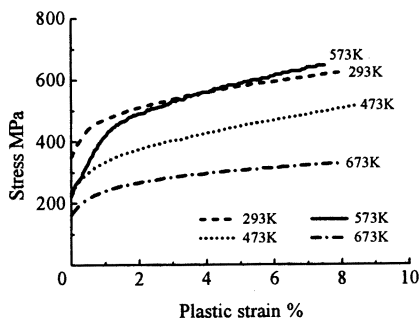


Fig.2 Static stress - plastic strain curves on SS400

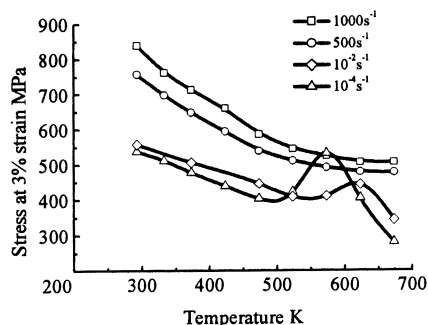


Fig.3 Relationships between stress and temperature on SS400

することが確認できる。しかし、500K付近に達すると応力値が増加して573K付近で最大となり、それ以降、再度減少する。図2において応力値が温度に対して急激な変化を示す573Kにおける応力-ひずみ曲線を、他の温度下における曲線と比較すれば、やや鋸波状を呈していることがわかる。これらの現象はいずれも、炭素鋼に特有な青熱脆性の影響である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

さらに、比較のため図3中に、以上の静的試験で用いた同一試験片による塑性ひずみ速度が約 10^{-2} , 500,

1000s⁻¹における一軸負荷圧縮試験の結果を、それぞれ◇, ○, □で示す. 塑性ひずみ速度が約10⁻²s⁻¹での結果は、上述の万能試験機を用いて得た. 塑性ひずみ速度が約500, 1000s⁻¹の結果は、ホプキンソン棒形一軸衝撃圧縮試験 (HPB 試験) より得た. なお、HPB 試験では、あらかじめ小型炉で加熱した試験片を試験機に迅速に設置することにより、高温下での圧縮試験を行った⁽⁵⁾.

同図より、塑性ひずみ速度10⁻²s⁻¹の結果では、623K付近で静的な場合と同様に応力値が増加している. ただし、増加の程度は静的な場合に比べれば緩やかである. また、塑性ひずみ速度500, 1000s⁻¹における応力と温度の関係においては、急激な応力値の変化はみられないが、温度に対する応力値の減少が緩やかになることがわかる.

上述の結果は、変形速度の上昇に伴い転位を固着する溶質原子の拡散速度の上昇が必要となるため、青熱脆性の現れる温度域が高温側に移行する現象⁽⁷⁾⁽⁸⁾をよく表している. また、高温になるほど応力に対する温度の影響が強くなるため青熱脆性の影響は小さくなる⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

以上より、青熱脆性域において炭素鋼の塑性変形挙動は、通常と逆の温度依存性を示し、その影響は、低ひずみ速度下において顕著に表れる. そのため、特に静的応力下における青熱脆性を考慮した構成式が重要である. そこで本論文では、まず、以上に示した測定結果などを基に、青熱脆性を考慮した広い温度域を対象とする静的応力-塑性ひずみ関係を表す構成式を検討する.

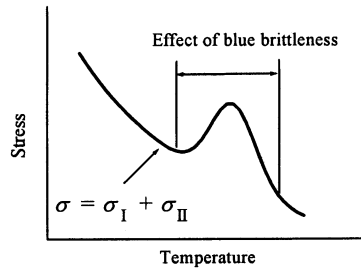
3. 青熱脆性を考慮した構成式

3.1 構成式形の検討 以上の測定結果より、SS400炭素鋼に生じる応力と温度との関係は、図4(a)に示す概略図のように、青熱脆性域において加工硬化量の増加に伴う急激な応力値の上昇を生じる. 本論文では、このような温度と応力の関係が図4(b)に示すように、2つの応力成分 σ_I および σ_{II} によって表されると仮定する. すなわち、 σ_I は青熱脆性の影響を受けず、温度上昇に対して単調減少し、通常温度依存性を示す成分を、 σ_{II} は青熱脆性により増加する応力成分を表す. 提案する構成式は、これら2つの成分を組合せることにより表すこととする.

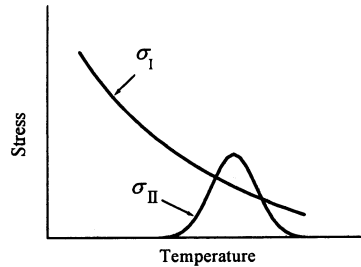
まず、青熱脆性の影響を受けず、温度上昇に対して単調減少する応力成分 σ_I を表す式形について検討する. 金属材料の真応力 σ と真ひずみ ε の関係は次式でよく表される⁽⁹⁾.

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots(1)$$

前報⁽⁵⁾では、式(1)を基本とし、青熱脆性の影響が生じない温度域の応力-塑性ひずみ関係を表す式を提案した. 本報においても同式を青熱脆性の影響を考慮しな



(a) Schematic of the stress-temperature relationship of steels



(b) Decomposition of the stress-temperature relationship

Fig 4 Relation between the stress and temperature of steels

い応力の成分 σ_I を表す式として用いる. すなわち

$$\sigma_I = K(\varepsilon_p + \alpha)^n \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 K, α, n は温度に依存する材料定数であり、 ε_p は塑性ひずみを表し、 α は降伏ひずみに相当する. 式(2)において塑性ひずみ ε_p を零とすれば、各温度下の降伏応力 σ_y は次式で表される.

$$\sigma_y = K\alpha^n \dots\dots\dots(3)$$

また、降伏点近傍において、弾性域も含めた応力-ひずみ曲線の変化率、すなわち、接線のこう配の変化が連続であるとすれば縦弾性係数 E が次式で表される.

$$E = \frac{\sigma_y}{\alpha} \dots\dots\dots(4)$$

次に、青熱脆性の影響を表す σ_{II} の関数形について検討する. 図4の概略図に示すように、 σ_{II} は青熱脆性域において温度の上昇に伴い急激に増加し、ある温度を越えると減少する. また、青熱脆性域以外では、その値は零となる. 物理的な考察から、このような現象を現す関数形を導くには、青熱脆性の原因となる溶質原子による転位の固着などを測定する必要があるが、実験的に困難であるため、本論文では同現象を近似することを主目的とし、種々の関数形を検討した. その結果、温度に対するこのような変化を表す σ_{II} の関数形として次式を提案する.

$$\sigma_{II} = C_1 \exp[C_2(T - T_0)^2] \varepsilon_p^{C_3} \dots\dots\dots(5)$$

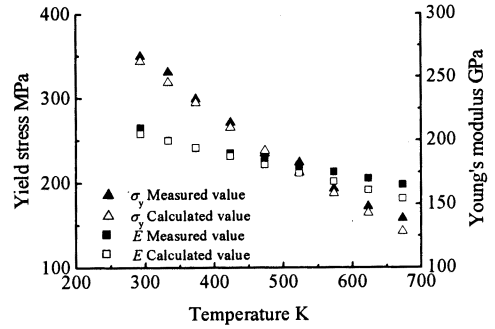
$C_1 \sim C_3$ および T_0 は未知の定数である。上式の指数関数部分は、温度 T_0 において最大となり、その前後で増加、減少する関数である。 $\varepsilon_p^{C_3}$ は、塑性ひずみの影響を表す項として指数関数に乗じたものであり、図2における573Kの測定結果が示すように、ひずみの増加とともに青熱脆性の影響が増加する効果を表すために用いる。

以上の結果より、本論文で提案する青熱脆性域を含む温度域で静的応力 σ_{st} と塑性ひずみ ε_p との関係を表す構成式の式形を σ_I と σ_{II} の和として次式で表す。

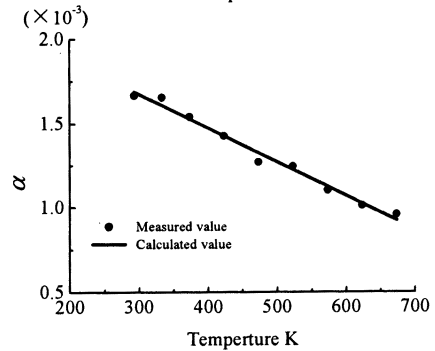
$$\sigma_{st} = K(\varepsilon_p + \alpha)^n + C_1 \exp[C_2(T - T_0)^2] \varepsilon_p^{C_3} \dots (6)$$

なお、実際の変形メカニズムは青熱脆性現象における、ひずみの減少などによると考えられ、構成式の構築においては青熱脆性に関与する塑性ひずみの変化を応力などの関数として表すことも考えられる。しかし、本論文では強度の変化に直接影響する青熱脆性域における応力の特徴的な現象を、従来用いられてきた式(1)と同様に塑性ひずみに対して簡便に表すことを主目的として、式(6)を構成式として検討する。また、動的な応力-ひずみ関係を表す、ひずみ速度依存形動的構成式では、静的応力に対する動的応力の増分である過応力をパラメータとする場合が多く、通常過応力はひずみ速度とともに増加する⁽¹⁰⁾。しかし、青熱脆性域で単純に過応力を求めれば、図3から予測されるように、その値はひずみ速度の増加に対し減少し、負となることもある。これは、従来の構成式が青熱脆性による影響を考慮していないためであるが、以上で提案した静的構成式を用いれば青熱脆性の影響を含まない σ_I の項を基に過応力を求め、さらに、ひずみ速度依存性を考慮した青熱脆性の影響を付加することで、高ひずみ速度域での応力-塑性ひずみ関係を表すことが考えられる。これらに関しては今後の検討課題としたい。

3.2 材料定数の決定法 前報では、式(3)に含まれる材料定数 K , α , n がいずれも温度に対して線形に変化するとして、常温(293K)および473Kでの応力-塑性ひずみ関係の測定値を近似することにより、これらの値を表す1次式を決定した。その結果、式(3)は293Kから473Kにおける応力-塑性ひずみ関係、縦弾性係数、降伏応力をいずれもよく表すことができた⁽⁹⁾。本論文においても、まず、 K , α , n がいずれも温度に対して線形に変化するとして293Kから473K、さらに、青熱脆性の影響が現れなくなる673Kにおける応力-塑性ひずみ関係の測定値を近似し式(3)を決定したところ、得られた構成式は青熱脆性が生じていない範囲で応力-塑性ひずみ関係、降伏応力をよく表すことが確認できた。しかし、縦弾性係数を精度よく表すことはできな



(a) Changes of Yield stress and Young's modulus of SS400 with temperature



(b) Changes of the yield strain α of SS400 with temperature
Fig. 5 Measured and calculated Yield stress, longitudinal elasticity and yield strain of SS400 with temperature

Table 2 Material constants for SS400

(a) $\alpha_i (i=0, 1)$ of Eq. (7)

	Value
α_0	2.21×10^{-3}
α_1 (K^{-1})	-1.89×10^{-6}

(b) $K_i, n_i (i=0, 1), C_1 \sim C_3, T_0$ of Eq. (6), (8)

	Value
K_0 (MPa)	1.24×10^3
K_1 (MPa/K)	-1.05
n_0	1.35×10^{-1}
n_1 (K^{-1})	8.02×10^{-5}
C_1 (MPa)	7.91×10^2
C_2 (K^{-2})	-4.95×10^{-4}
C_3	3.53×10^{-1}
T_0 (K)	581

かった。これは、対象とする温度域が拡大したこと、また、降伏点近傍における応力のひずみに対する変化率が急であり、応力-塑性ひずみ関係のみでは、縦弾性係数を近似するためのデータが十分でないことが原因と考えられる。

そこで本論文では、式(7)により応力-塑性ひずみ関係だけでなく縦弾性係数も表現可能とするために、 ε_p を

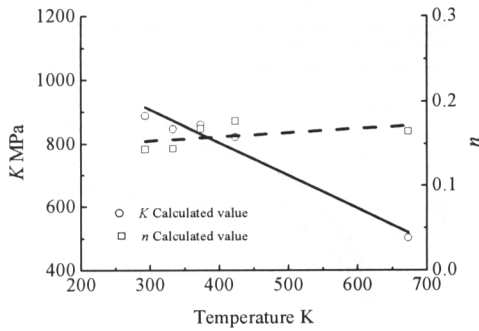


Fig. 6 Changes of K and n of SS400 with temperature

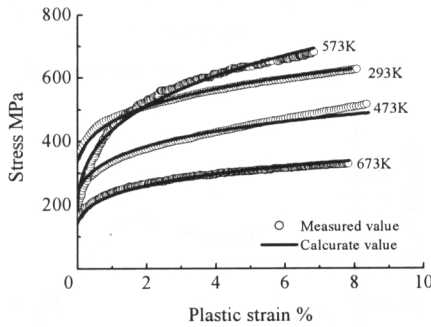


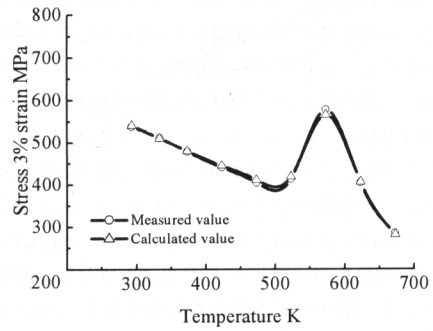
Fig. 7 Measured and calculated stress - plastic strain curves

零として得られる式(6)または式(4)において縦弾性係数を表す α の温度に対する変化を、応力-塑性ひずみ関係ではなく各温度下における縦弾性係数および降伏応力の測定値から直接検討することとした。なお、本論文で用いる高温下静的圧縮試験より縦弾性係数を精度よく求めることは困難であるため、前報と同じく同値がひずみ速度に依存しないとして、HPB試験の結果より求めた⁽⁵⁾。図5(a)にSS400炭素鋼の温度に対する降伏応力および縦弾性係数の温度に対する変化をそれぞれ▲および■で示す。さらに、同図に示した降伏応力を縦弾性係数で除して得られる降伏ひずみ α の温度に対する変化を図5(b)に●で示す。図5より、 α は温度に対して、ほぼ線形に変化する。そこで、本論文においても α を温度に対する1次式として次式で表すこととする。

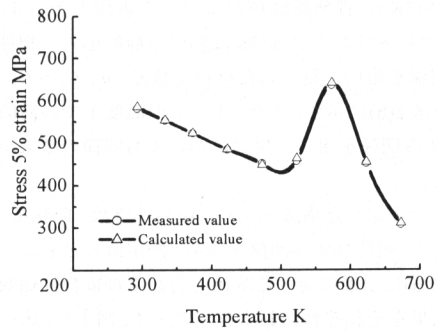
$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 T \dots\dots\dots (7)$$

上式に含まれる $\alpha_i (i=0, 1)$ の値を図5(b)に示した293, 473, 523, 573, 623, 673Kにおける測定結果より決定して表2(a)に示し、同値を用いた式(7)より得られる計算結果を図5(b)中に実線で示す。なお、測定を行った全ての温度下の結果を用いても α_i はほぼ同じ値となるが、本論文ではより少数の測定結果より構成式が決定されることを確認するために以上の温度下での測定結果を用いた。

次に、式(6)右辺第1項に含まれる未知の材料定数 K ,



(a) Plastic strain of 3%



(b) Plastic strain of 5%

Fig. 8 Relation between stress and temperature on SS400

n の温度に対する変化を検討する。すなわち、式(7)に含まれる α_i を代入した式(6)の右辺第1項を用いて青熱脆性の影響が現れていない常温(293K)から423K、および青熱脆性域を終了した673Kにおける各温度下で測定した静的応力-塑性ひずみ関係をそれぞれ非線形最小二乗法で近似して各温度下における K および n の値を求めた。なお、非線形最小二乗法にはガウス・ニュートン法を用いた⁽¹¹⁾。得られた結果を図6に示す。青熱脆性域である450~650Kを除くため測定値の間隔に一部幅があるが、 K の値は温度に対してほぼ線形に変化し、また、 n の値は変化はわずかであるが直線的とみなせる。そこで、前報⁽⁵⁾と同じくこれらを次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} K &= K_0 + K_1 T \\ n &= n_0 + n_1 T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

以上の結果より、本論文では青熱脆性を考慮したSS400炭素鋼の温度依存性構成式を、式(6)に式(7)および式(8)を代入した式として提案する。なお、本論文では式(6)と記した場合、同式中の α 、 K および n は式(7)および(8)で表されるものとする。

提案する温度依存性構成式に含まれる未知の材料定数の決定方法は以下の通りである。まず、式(7)に含まれる定数 α_i は、先述のように降伏応力を縦弾性係数で除して得た降伏ひずみを近似することで決定する。さ

らに、決定した α_i を式(7)に代入し、青熱脆性の影響が生じている温度域を含む室温から673Kまでの各温度下における応力-塑性ひずみ関係を、ガウス・ニュートン法を用いた非線形最小二乗法で同時に近似することで他の材料定数 K_i , $n_i(i=0, 1)$, $C_1 \sim C_3$, T_0 を決定する。

以上の手順によってSS400炭素鋼に関する構成式の決定を行った結果は以下の通りである。まず、 α_i に関しては上述の通り表2(a)の値となる。次に、式(7), (8)を代入した式(6)を用いて、 α_i を表2(a)の値とし、測定を行った応力-塑性ひずみ関係を非線形最小二乗法で同時に近似し、他の材料定数を決定した。なお、ここでは室温(293K)、青熱脆性域およびその近傍である473, 523, 573, 623および673Kにおける静的応力-塑性ひずみ関係を用いて得られた材料定数 K_i , n_i , $C_1 \sim C_3$, T_0 の値を表2(b)に示す。また、すべての温度下での静的応力-ひずみ関係を用いた場合においても同様の結果が得られた。

以上で決定した構成式より、縦弾性係数、降伏応力、静的応力-塑性ひずみ関係を求め、測定値とともに示す。図5(a)に温度に対する降伏応力および縦弾性係数の計算結果をそれぞれ Δ および \square で示す。図より、広い温度域で式(6)は実際の縦弾性係数、降伏応力をよく表している。図7には決定された式(6)より得られる293, 473, 573および673Kにおける応力-塑性ひずみ関係を、測定値とともに示す。図7より、構成式は測定値をよく近似している。なお、結果は略すが、測定結果を近似に用いなかった温度域を含む、他の各温度化における応力-塑性ひずみ関係も、決定された構成式によりよく表すことができた。さらに、塑性ひずみが3%および5%での応力値と温度の関係を求め測定値と比較した。その結果を図8(a)および(b)に示す。図7および図8より、いずれの図においても計算値と測定値が良く一致しており、提案した式(7)および(5)で表される構成式が、青熱脆性域を含む広い温度域で試験片に用いたSS400炭素鋼の変形挙動を表し得ることが確認できる。

4. S45C炭素鋼への適用

以上で提案した、青熱脆性を考慮した静的応力-塑性ひずみ関係を表す構成式が、SS400炭素鋼と同様に青熱脆性を生じるS45C炭素鋼に対して適用可能であることを確認する。まず、表3に化学組成を示すS45Cを供試材に、2.1節と同一な方法により高温下静的圧縮試験を行った。試験片形状はSS400の場合と同一とし、試験温度は常温(293K)、333K、423K、それ以降673Kまでは50Kごとの各温度とし、試験速度は試験片に生じるひずみ速度が約 10^{-4} s $^{-1}$ となるように調整した。静的試験より得られた静的応力-塑性ひずみ関係を図9に示

Table 3 Chemical composition of S45C (mass%)

	C	Si	Mn	P	S
S45C	0.43	0.21	0.61	0.011	0.006

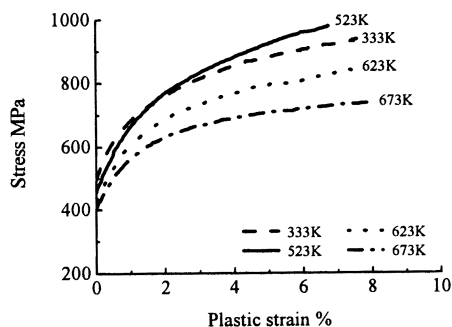
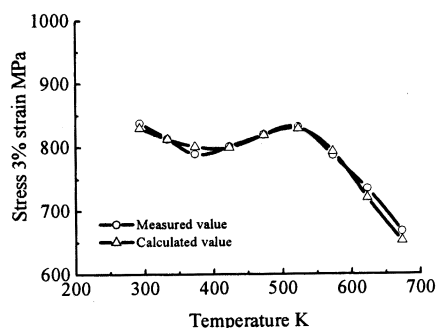
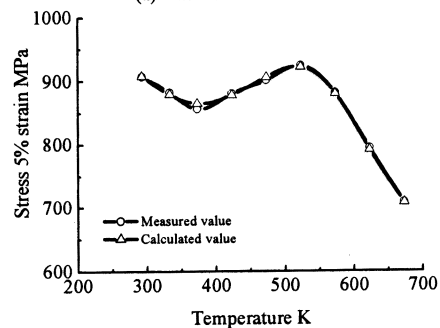


Fig.9 Static stress - plastic strain curves on S45C



(a) Plastic strain of 3%

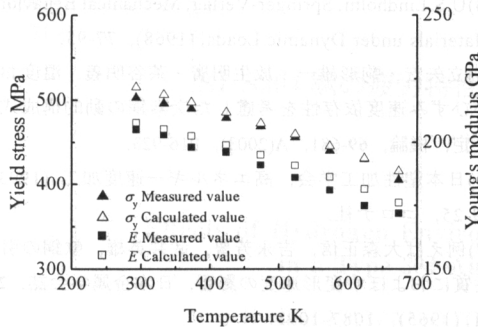


(b) Plastic strain of 5%

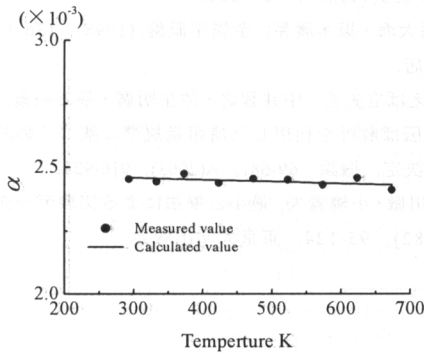
Fig. 10 Relation between stress and temperature on S45C

す。さらに、塑性ひずみが3%および5%における温度と応力との関係を図10(a)および(b)に \circ で示す。図9および図10より、S45C炭素鋼においても応力値が温度とともに減少する温度依存性が確認される。さらに、373K付近以降において、急激な応力値の増加と減少がみられ、SS400炭素鋼と同様な青熱脆性の影響が確認できる。

以上の測定結果を用い、前章で示した方法でS45C炭素鋼を対象とし、式(6)に含まれる未知の材料定数を決



(a) Changes of yield stress and Young's modulus of S45C with temperature



(b) Change of α of S45C with temperature

Fig. 11 Yield stress and Young's modulus

Table.4 Material constants for S45C

(a) $\alpha_i (i=0, 1)$ of Eq. (7)

	Value
α_0	2.56×10^{-3}
$\alpha_1 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	-2.82×10^{-7}

(b) (b) $K_i, n_i (i=0, 1), C_1 \sim C_3, T_0$ of Eq. (6), (8)

	Value
$K_0 \text{ (MPa)}$	1.86×10^3
$K_1 \text{ (MPa/K)}$	-1.11
n_0	1.94×10^{-1}
$n_1 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	-4.40×10^{-5}
$C_1 \text{ (MPa)}$	6.90×10^2
$C_2 \text{ (K}^{-2}\text{)}$	-9.88×10^{-5}
C_3	5.04×10^{-1}
$T_0 \text{ (K)}$	537

定する。まず、式(6)中の α を表す式(7)に含まれる未知の材料定数 α_i を決定するために、SS400 炭素鋼の場合と同じく上述の S45C 炭素鋼試験片を用い、静的圧縮試験と同一の各温度下で衝撃圧縮試験を行って縦弾性係数を求めた。図 11(a)に S45C 炭素鋼の温度に対する降伏応力および縦弾性係数の温度に対する変化をそれぞれ▲および■で示す。さらに、同図に示した降伏応力

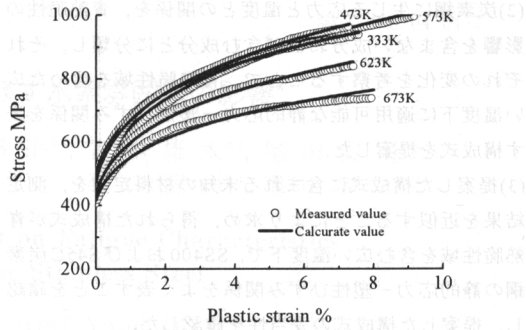


Fig. 12 Static stress - plastic strain curves on S45C

を縦弾性係数で除して得られる降伏ひずみ α の温度に対する変化を図 11(b)に●で示す。図 11(b)より、SS400 炭素鋼と同じく、 α は温度に対してほぼ線形に変化することが確認できる。そこで、293,373,423,523,623 および 673K における α の測定結果を用い、線形最小二乗法で α_i を求めた。結果を表 4(a)に、また、得られた定数による α の計算結果を図 11(b)に直線以示す。

次に、以上で決定された α_i を用いて、提案する構成式に含まれる未知の材料定数 $K_i, n_i, C_1 \sim C_3, T_0$ を試験片に用いた S45C 炭素鋼に関して決定する。すなわち、293,373,423,523,623 および 673K の各温度下における応力-塑性ひずみ関係を、非線形最小二乗法により α_i の値を代入した式(6)を用いて近似する。

得られた S45C 試験片の材料定数 $K_i, n_i, C_1 \sim C_3, T_0$ を表 4(b)に、また、決定された構成式より求めた縦弾性係数および降伏応力を測定値との比較のために図 11 に△および□で示す。図 12 には材料定数の決定には用いなかった 333, 473, 573K, さらに、決定にも用いた 623,673K における応力-塑性ひずみ関係の計算値を測定値とともに示す。さらに塑性ひずみ 3% および 5% における温度に対する応力値の変化を同式より求め図 10 中に△で示し、測定値と比較する。図 12 より、得られた構成式は各温度下における応力-塑性ひずみ関係をよく表している。また、図 10 より同構成式が、500K 付近で生じる青熱脆性の影響をよく表している。

すなわち、提案する構成式は、青熱脆性域を含む広い温度域にわたり、SS400 のみならず S45C 炭素鋼の静的な変形挙動を表す式として用いることができる。

5. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する。

(1)高温下において SS400 および S45C 炭素鋼を試験片とした静的圧縮試験を行い、種々の温度下におけるこれらの材料の応力-塑性ひずみ関係を得るとともに、いずれの材料においても、その変形挙動に青熱脆性の影響が現れることを確認した。

(2)炭素鋼に生じる応力と温度との関係を、青熱脆性の影響を含まない成分および含む成分とに分類し、それぞれの変化を考察することで、青熱脆性域を含めた広い温度下に適用可能な静的応力-塑性ひずみ関係を表す構成式を提案した。

(3)提案した構成式に含まれる未知の材料定数を、測定結果を近似することにより求め、得られた構成式が青熱脆性域を含む広い温度下で、SS400およびS45C炭素鋼の静的応力-塑性ひずみ関係をよく表すことを確認し、提案した構成式の妥当性を確認した。

文 献

- (1)谷村眞治・三村耕司・榎田努, 広ひずみ速度域を対象とした各種材料グループに適用し得る実用構成式, 材料, 50-3, (2001), 210-216.
- (2)例えば林卓夫・田中吉之助, 衝撃工学, (1988), 64-70, 日刊工業新聞社.
- (3)S.Tanimura, A practical constitutive equation covering a wide range of strain rates, Int.J.Eng.Sci, 17-9, (1979), 997-1004.
- (4)U.S.Lindholm, Springer-Verlag, Mechanical Behavior of Materials under Dynamic Loads, (1968), 77-95.
- (5)立矢宏・駒形雄一・放生明廣・茶谷明義, 温度およびひずみ速度依存性を考慮した炭素鋼の動的構成式の決定, 機論, 69-681, A(2003), 916-923.
- (6)日本塑性加工学会, 高エネルギー速度加工, (1993), 19-25, コロナ社.
- (7)例えば大森正信, 吉永芳豊, 武井英雄, 軟鋼の引張性質におよぼす変形速度の影響, 日本金属学会誌, 29-11, (1965), 1087-1093.
- (8)大森正信, 材料性質と環境(その2), 日本機械学会誌, 76-653, (1973), 555-566.
- (9)宮川大海・坂木庸晃, 金属学概論, (1998), 136-137, 朝倉書店.
- (10)例えば立矢宏・中井智之・放生明廣・茶谷明義, 弾塑性波伝ば解析を利用した情報量規準に基づく動的構成式の決定, 機論, 69-681, A(2003), 916-923.
- (11)中川徹・小柳義夫, 最小二乗法による実験データ解析, (1982), 95-124, 東京大学出版会.