

## 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\*

立矢 宏<sup>\*1</sup>, 駒形 雄一<sup>\*2</sup>  
放生 明廣<sup>\*1</sup>, 茶谷 明義<sup>\*1</sup>

## Determination of Dynamic Constitutive Equation with Temperature and Strain-Rate Dependence for a Carbon Steel

Hiroshi TACHIYA<sup>\*3</sup>, Yuichi KOMAGATA,  
Akihiro HOJO and Akiyoshi CHATANI<sup>\*3</sup>Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University,  
2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-8667 Japan

A practical model of a temperature and strain-rate dependent dynamic constitutive equation for carbon steels is proposed. Unknown material constants involved in the proposed constitutive equation can be determined by the non-linear least squares method, which approximates ordinary-impact-test results with calculated values of elasto-plastic waves propagation analyses. In addition static stress-strain curves, longitudinal elastic modulus and yield stress, which are needed for elasto-plastic waves propagation analyses with the proposed constitutive equation, are expressed as a function of temperature. These results enable elasto-plastic waves propagation analyses under wide strain-rate and temperature ranges easily. The present paper has actually determined material constants involved in the proposed constitutive equation and compared the calculated results with measured ones. As a result, it has been confirmed that the proposed equation is applicable at a wide strain rate range and at a room temperature to less than one in which blue brittleness occurs.

**Key Words:** Dynamic Constitutive Equation, Strain-Rate Sensitivity, Temperature Sensitivity, Impact, Elevated Temperature, Stress-Strain Curve, Elasto-Plastic Waves Propagation Analysis, Uniaxial Compression Test, Carbon Steel

## 1. 緒言

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知られており、一般にはひずみ速度の上昇に伴い変形応力が増加し、温度の上昇に伴い変形応力が低下する。したがって、機械や構造物の衝撃負荷に対する変形挙動の予測や、高速塑性加工時の加工パラメータの決定などのために、材料の動的な弾塑性変形挙動を表す、ひずみ速度依存性および温度依存性を考慮した動的構成式の確立が望まれる<sup>(1)</sup>。そのため、現在までも主として転位の運動力学的考察に基づく、いくつかの動的構成式が提案されている<sup>(2)~(5)</sup>。

これら構成式の多くは、転位速度に関するJohnstonらの実験結果および熱活性化過程に対するアレニウスの式に基づき、活性化エネルギーを過応力または背応力の関数などとするにより具体的な式形が導かれている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、これまで提案されている構成式は、式形が複雑であり、また、式に含まれる材料定数の決定も容易ではなく、必ずしも実用的でない場合が多い。

材料の動的構成式は、材料の種類のみならず、その化学組成や、熱処理などにより、式に含まれる定数値も異なることが予想される。したがって、より詳細な材料の

変形挙動の解析を簡便に行うためには、広いひずみ速度および温度域にわたり適用可能である簡潔な動的構成式を確立するとともに、式に含まれる定数値を、対象とする材料に応じて通常の試験結果より容易に決定可能とすることが望まれる。

そこで著者らは先に、ひずみ速度依存性を考慮した簡潔な動的構成式を示す<sup>(6)(7)</sup>とともに、同式中のパラメータを非線形最小二乗法により決定する方法を提案し、得られる動的構成式が広いひずみ速度域にわたり、実際の変形挙動をよく表すことを示した<sup>(8)</sup>。しかし、上述のように、材料の変形挙動は温度にも強く依存する。そこで、本論文では、これまでの結果を基にひずみ速度および温度依存性をともに表現しうる簡潔な式形の動的構成式を炭素鋼を対象として提案し、同構成式中の材料定数を通常の一軸負荷圧縮試験の結果より決定する方法を述べるとともに、実際にその値を決定して、得られた動的構成式が広いひずみ速度および温度域にわたり、材料の変形挙動をよく表すことを示す。

## 2. 動的構成式の提案と材料定数の決定法

2.1 動的構成式 著者らは先に、塑性変形の速度と温度に対する依存性が、熱活性化過程で進行する転位の運動で説明される<sup>(9)</sup>ことに基づき、炭素鋼を対象として、動的な塑性変形挙動を表す次式を示した<sup>(6)</sup>。

\* 原稿受付 2002年8月19日。

<sup>\*1</sup> 正員, 金沢大学工学部(☎920-8667 金沢市小立野2-40-20)。<sup>\*2</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科。

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

$$\dot{\gamma}_p = \frac{NbV_0}{\frac{V_0}{\nu L} \exp\left[\frac{U_0 - a(\tau - \tau^*)}{kT}\right] + \exp\left[\frac{D'}{kT(\tau - \tau^*)}\right]} \quad (1)$$

式中の、 $\gamma_p$ ,  $\tau$ ,  $\tau^*$  および  $T$  は、それぞれ塑性せん断ひずみ、せん断応力、背応力および温度を示す。 $\gamma_p$  に付された “ $\cdot$ ” は時間での微分を表し、 $\dot{\gamma}_p$  は塑性せん断ひずみ速度を示す。 $N, b, \nu, L, U_0, a$  および  $k$  は、それぞれ可動転位密度、バーガスベクトルの大きさ、熱エネルギーによる転位の振動数、転位林など障害物間の平均距離、応力が零であるときの活性化エネルギー、活性化体積およびボルツマン定数を表す。また、 $V_0$  および  $D'$  は、それぞれせん断波の伝ば速度およびパイエルス力などによって決定される材料定数である。

上式に含まれる定数の値は、転位論などに基づく検討より得ることも期待できるが、そのためには複雑な考察および実験を要する。また、実際に定数が決定されたとしても、上式は単純化されたモデルを対象として導かれた結果であることから、材料の変形挙動を実際によく表すとは限らない。そこで、著者らは式(1)の右辺において応力を除く項を未知の定数として整理し、一軸負荷の圧縮試験より各定数値を決定する方法を示すとともに、得られた構成式が広いひずみ速度域にわたり、材料の変形挙動をよく表すことを確認した。(6)(8)

本論文では、さらに、式(1)を基にひずみ速度のみならず、温度依存性を表し得る動的構成式を導く。すなわち、これまでは式(1)において応力を除く他の項を未知の定数としていたが、本報では温度依存性を考慮するために、温度  $T$  を応力とともに変数とする。さらに、未知の定数を簡便な一軸負荷の圧縮試験の結果より決定するために、 $\tau$  を垂直応力  $\sigma$  に、 $\gamma_p$  を垂直塑性ひずみ  $\epsilon_p$  に置き換え、応力、ひずみおよび温度に関係しない材料定数をまとめ、式(1)を次式のように整理する。

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{P_1}{\exp\left[\frac{P_3 - P_2(\sigma - \sigma^*)}{T}\right] + \exp\left[\frac{P_4}{T(\sigma - \sigma^*)}\right]} \quad \dots (2)$$

なお、式(2)に含まれる背応力  $\sigma^*$  を理論的に求めることは容易ではない。そこで、前報と同じく同値が加工硬化にともなって増加することに注目し次式で表す(6)(7)。

$$\sigma^* = \sigma_s(\epsilon_p) - \sigma_s \quad \dots (3)$$

$\sigma_s(\epsilon_p)$  および  $\sigma_s$  はそれぞれ、ある温度下における静的応力-塑性ひずみ関係および降伏応力を示す。以上の結果より本論文では温度およびひずみ速度依存性を考

慮した動的構成式として次式を提案する。

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{P_1}{\exp\left[\frac{P_3 - P_2(\sigma_{ov} + \sigma_y)}{T}\right] + \exp\left[\frac{P_4}{T(\sigma_{ov} + \sigma_y)}\right]} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{ov}$  は次式で表されるいわゆる過応力である。

$$\sigma_{ov} = \sigma - \sigma_s(\epsilon_p) \quad \dots (5)$$

以下、本論文では一軸負荷の衝撃圧縮試験の結果などより式(4)中の未知の材料定数  $P_1 \sim P_4$  を決定するとともに、同式が広い温度およびひずみ速度域にわたり材料の動的な変形挙動を表し得ることを確認する。なお、本論文では応力およびひずみには、いずれも公称値を用いる。

2.2 材料定数の決定方法 動的構成式内の未知の材料定数  $P_1 \sim P_4$  は、著者らが以前に提案した方法に基づき(8)、測定が比較的容易なひずみ速度波形の結果から以下のように決定する。まず、図1に装置の概略を示すホプキンソン棒形一軸衝撃圧縮試験 (HPB 試験) により、入力棒に作用する衝撃端速度および試験片に生じるひずみ速度の変化を測定する。次に、測定した衝撃端速度波形を入力条件として、HPB 試験の弾塑性波伝ば解析を式(4)を用いて行う。さらに、解析より得る試験片に生じるひずみ速度波形の計算値と実際の測定値との残差が最小となるようにガウス・ニュートン法を用いた非線形最小二乗法(10)で動的構成式内の材料定数を決定する。なお、式(4)が静的な塑性変形も表すように、式中の過応力  $\sigma_{ov}$  が零である場合の塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_p$  の計算値に対する測定値を  $10^{-4} \text{s}^{-1}$  として、その残差二乗和も上述の残差に加える。

材料定数を決定するための弾塑性波伝ば解析には、一次元伝ば理論に基づく次式を用いる(11)。

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} &= \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \dot{\epsilon}_p \end{aligned} \right\} \quad \dots (6)$$

式中の  $x$  および  $t$  はそれぞれ、軸方向座標および時間を示す。 $v, \epsilon, \rho$  および  $E$  はそれぞれ、変位速度、全ひずみ、密度および縦弾性係数を表し、応力およびひずみは圧縮を正とする。本論文では上式の数値解を特性曲線法(11)により得た。

### 3. 試験方法および測定結果

3.1 衝撃圧縮試験 動的構成式を決定するための測定値を得る材料の衝撃試験には、前述のようにホプ

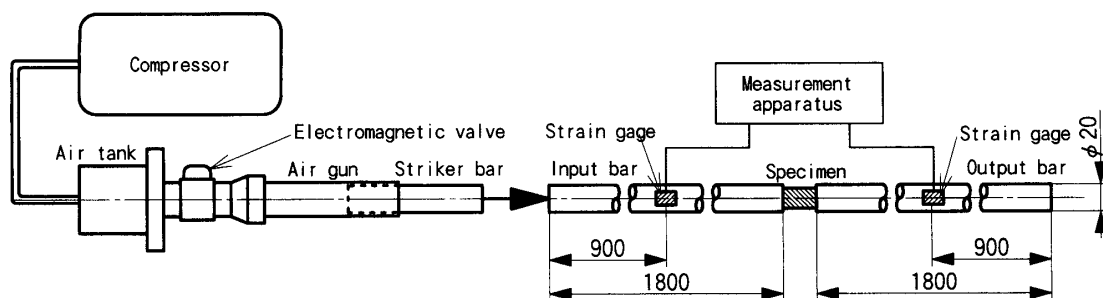


Fig.1 Experimental apparatus of the HPB (unit : mm)

キンソン棒形一軸衝撃圧縮試験を用いた。用いた試験機は図1に示すように、入出力棒および打撃棒の直径が20mm、入出力棒の長さが1800mmであり、打撃棒は空気圧を利用して加速する。なお、打撃棒には、長さが200、300および400mmである3種類の丸棒を用いた。短い打撃棒は、設定可能な空気圧に対して高い打撃速度を得ることができ、高ひずみ速度域での試験を行うために用いる。また、長い打撃棒を用いれば負荷圧縮時間を増加させることができ、低ひずみ速度域の試験においても必要なひずみ量を得ることができる。

圧縮負荷により、試験片に生じる応力、ひずみおよびひずみ速度は、入力棒に貼付したひずみゲージで測定される入射および反射ひずみを $\epsilon_i$ および $\epsilon_r$ 、出力棒に貼付されたひずみゲージで測定される透過ひずみを $\epsilon_t$ として、次式より求めた<sup>(12)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{AE}{2a} (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \\ \epsilon &= \frac{C_0}{l_s} \int (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \\ \dot{\epsilon} &= \frac{C_0}{l_s} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $C_0$ および $l_s$ は、入出力棒中の弾性波の伝ば速度および試験片長を表し、 $A$ および $a$ はそれぞれ入出力棒および試験片の断面積を示す。

対象とする材料はSS400炭素鋼納入材とし、試験片の寸法を長さ10mm、直径9mmの円柱とした。その化学組成は表1に示すとおりである。試験片には、両端面が試験片長手方向に対して直角となるように研削仕上げを施した。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った。

試験時の試験片の加熱には小型炉を用い、あらかじめ加熱した試験片を炉から試験機に迅速に移動させることにより試験を行った。なお、試験時には試験片から試験装置への熱伝達などが生じると考えられるが、本論文では衝撃負荷時間が極短時間であること、試験片を試験機に設置後短時間で圧縮を行うよう配慮するこ

Table1 Chemical composition of the specimen (mass%)

	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.10	0.20	0.50	0.022	0.028

とにより、試験中における試験片の温度を一定とみなした。ただし、試験片を炉から取り出し、圧縮するまでには数秒を要するため、試験片の温度降下が無視できない。そこで、加熱後、圧縮するまでの時間が5secとなるように試験を行うこととし、同時間に対する温度降下量を、集中熱容量法<sup>(13)</sup>および実際の測定から予測し、目的の試験温度に対する加熱温度を決定した。

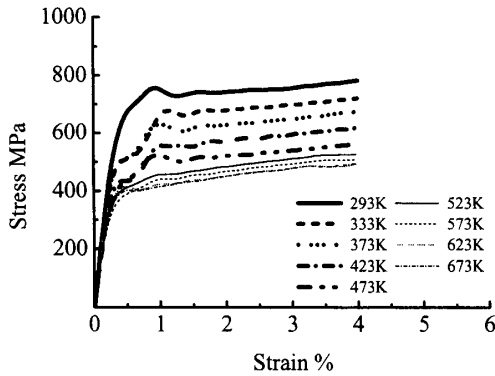
上述のような試験方法により種々の温度下で衝撃圧縮試験を行った。試験温度は常温(293K)から373Kまでは40Kごと、それ以後673Kまで50Kごとに、計9種類の温度下で試験を行った。各試験では、最大塑性ひずみ速度が約500s<sup>-1</sup>および1000s<sup>-1</sup>、ひずみの最小値が4%程度となるように空気圧と打撃棒長さを調節した。なお、ひずみの測定時間間隔は1μsとした。試験は各条件において複数回行うとともに、式(7)による処理においては、 $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_r$ および $\epsilon_t$ の測定波形立ち上がり開始とみなせる時刻に加え、立ち上がり時刻を前後に1μs変化させ同じく処理を行い、得られたこれらの結果から波形の乱れの少ない測定値を採用した。

高温下衝撃圧縮試験の結果得られた、最大塑性ひずみ速度が約500s<sup>-1</sup>および1000s<sup>-1</sup>における応力-ひずみ関係を図2(a)および(b)に示す。図2より、両試験結果共に、応力値が温度の上昇に伴い大きく減少する温度依存性が確認できる。

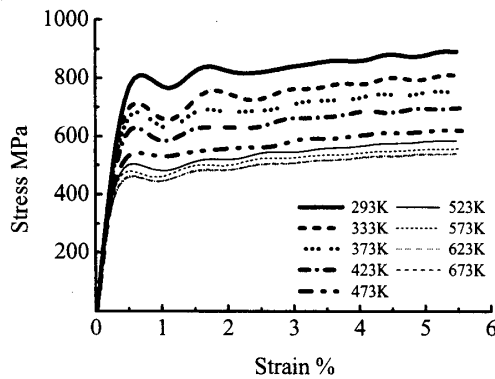
### 3.2 静的圧縮試験および動的構成式の適用範囲

2章で述べた方法により、動的構成式を決定するためには、上述の各衝撃圧縮試験結果と同温度下における試験片の静的な応力-ひずみ関係を必要とする。そこで、万能試験機を用いて高温下における静的圧縮試験を行った。なお、使用した試験片は、材質・形状ともに衝撃試験と同一である。

圧縮時に試験片に生じる応力値は試験機に付属のロードセルより測定した。試験片のひずみは、試験片に



(a) Results at a plastic strain rate of  $500s^{-1}$



(b) Results at a plastic strain rate of  $1000s^{-1}$

Fig.2 Dynamic stress-strain curves at various temperatures

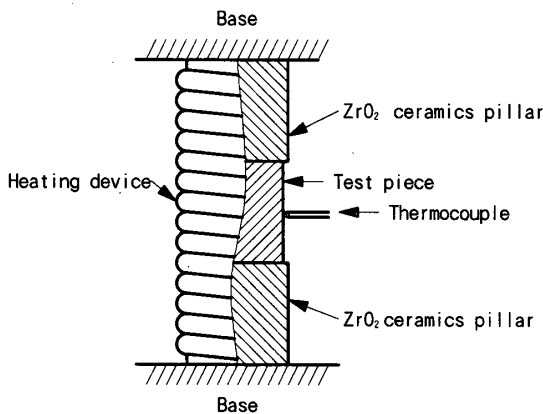


Fig.3 Schematic diagram of the static compression test

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 $0.8\mu m$ 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、弾性域の変形量が極めて小さく、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ため、測定結果としては降伏点以降の値を示す。なお、降伏点は、万能試験機による試験片の圧縮が低速であり、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値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

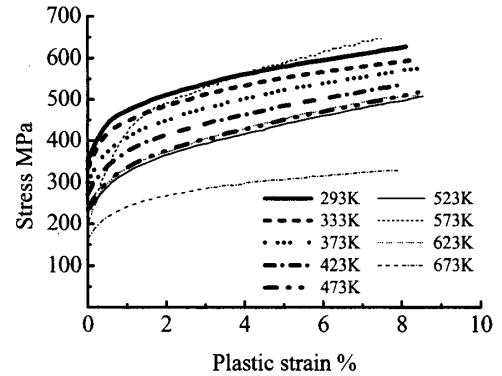


Fig.4 Static stress-plastic strain curves at various temperatures

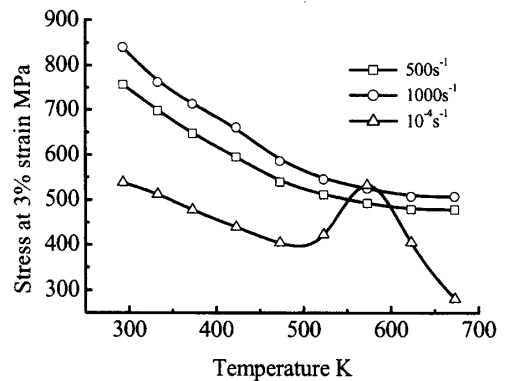


Fig.5 Relationship between the stresses and temperatures

の変化率も急激に減少することを確認して決定した。

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付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3に示す。

上述の方法を用い、衝撃圧縮試験と同じく常温(293K)から373Kまで40Kごと、それ以後673Kまで50Kごとの、計9種類の温度下で静的圧縮試験を行った。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。静的圧縮試験から得られた応力-塑性ひずみ関係を図4に示す。

図5には図2および4に示す結果より得た、ひずみが3%時における衝撃および静的応力と温度との関係を示す。同図より、ひずみ速度の上昇に伴い応力値も増加しており、ひずみ速度依存性が確認される。また、応力値は全体的に右下がりであり温度依存性も確認される。しかし、衝撃試験では約673K付近、静的試験では約523K付近以降において温度に対する応力値の変化が緩やかになり、静的試験では一時的に急激な応力値の上昇がみられる。これは、炭素鋼の変形挙動に、ある温度、ひずみ速度に

において生じる青熱脆性<sup>(14)</sup>である。本論文では示していないが、青熱脆性が生じる温度はひずみ速度とともに上昇する<sup>(14)</sup>ため、衝撃応力と温度との関係においても、700K以上で同様な現象が生じると予測される。

提案する動的構成式は、青熱脆性の影響を考慮して導かれていないため、ある条件下に限って他とは逆の温度およびひずみ速度依存性を表すことは難しい。そこで、本論文で提案する動的構成式の適用温度範囲は常温(293K)から473Kまでとし、青熱脆性をも考慮した動的構成式に関しては基礎式の検討も含め今後の課題とする。

#### 4. 動的構成式の決定

4.1 静的応力-塑性ひずみ関係の近似 式(4)で示した動的構成式を用いて弾塑性波伝ば解析を行うためには、各温度下における材料の静的な応力-塑性ひずみ関係、縦弾性係数、降伏応力をそれぞれ必要とする。しかし、動的構成式を用いた解析において対象とする温度ごとに、これらの値をそれぞれ測定することは実用的でない。そこで、本論文では任意の温度下における材料の静的な応力-塑性ひずみ関係、縦弾性係数、降伏応力を、測定結果に基づき以下のように近似する。

一般に、金属材料の真応力-真ひずみ関係は、次式で近似されることが多い<sup>(15)</sup>。

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)は真応力-真ひずみ関係において提案されているものであるが、本論文で対象とするひずみ範囲は数%程度と小さく、また塑性域のみを考慮することから、式(8)を基本とし、降伏ひずみに相当する $\alpha$ を用いた次式で公称応力-公称ひずみ関係を表す。

$$\sigma_s(\varepsilon_p) = K(\varepsilon_p + \alpha)^n \quad \dots\dots\dots (9)$$

なお、 $K$ 、 $\alpha$ 、 $n$ は温度に依存する材料定数とする。

式(9)に含まれる材料定数 $K$ 、 $\alpha$ 、 $n$ の温度依存性を調べるため、各温度ごとに式(9)による計算値が静的圧縮試験より得られた応力-塑性ひずみ関係に一致するように非線形最小二乗法を用いて各材料定数を決定した。得られた $K$ 、 $\alpha$ 、 $n$ の値を○、□、△で図6にそれぞれ示す。図6より、293Kから473Kまでの温度範囲で、塑性ひずみ速度が約 $10^{-4} \text{s}^{-1}$ の下では、各材料定数は温度に対しほぼ線形に変化することが確認される。そこで、各定数を次式のように温度 $T$ に対する一次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} K &= K_0 + K_1 \cdot T \\ \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T \\ n &= n_0 + n_1 \cdot T \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $K_1$ 、 $\alpha_1$ 、 $n_1$  ( $i = 0, 1$ ) は未知の定数である。各温度下の降伏応力 $\sigma_y$ および縦弾性係数 $E$ は、式(9)にお

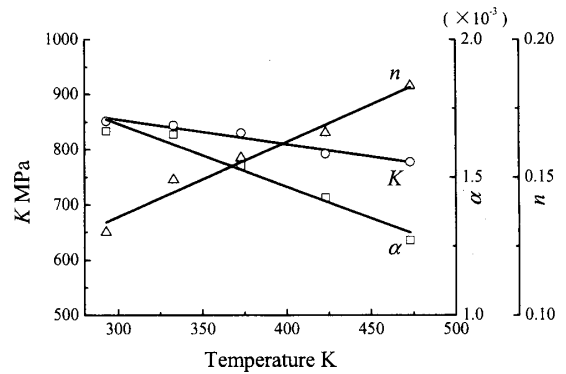


Fig.6 Changes of the static material constants of Eq.(9) with temperatures

Table 2 Material constants of Eq. (10)

$K_0$ (MPa)	$1.02 \times 10^3$
$K_1$ (MPa/K)	-0.502
$\alpha_0$	$2.32 \times 10^{-3}$
$\alpha_1$	$-2.22 \times 10^{-6}$
$n_0$	$5.80 \times 10^{-2}$
$n_1$	$2.69 \times 10^{-4}$

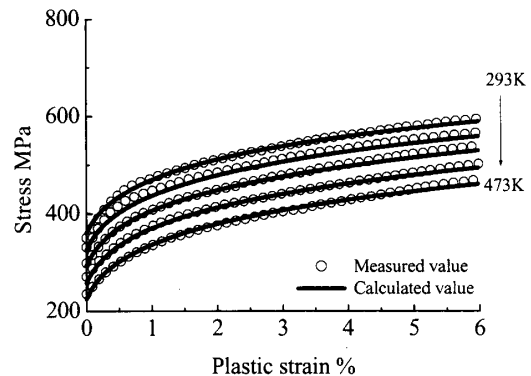


Fig.7 Measured and calculated static stress-strain curves

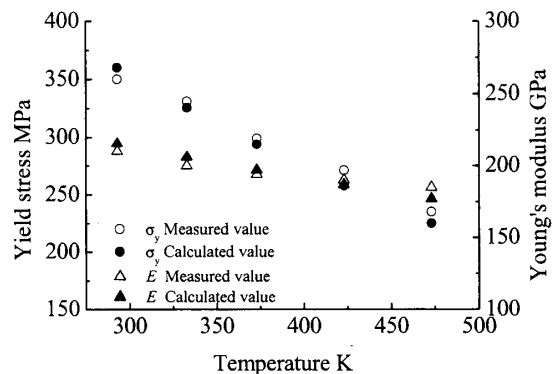


Fig.8 Changes of the yield stresses and Young's modulus

Table 3 Test machine's conditions for the simulation

	Material	Length (mm)	Diameter (mm)	Young's Modulus (GPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)
Input bar	S55C	450	20	206	7900	15100
Output bar	S55C	450	20	206	7900	15100

Table 4 Specimen's conditions for the simulation

	Material	Temperature (K)	Length (mm)	Diameter (mm)	Young's Modulus (GPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)
Specimen	SS400	293	10	9	215	7900	359
	SS400	473	10	9	177	7900	224

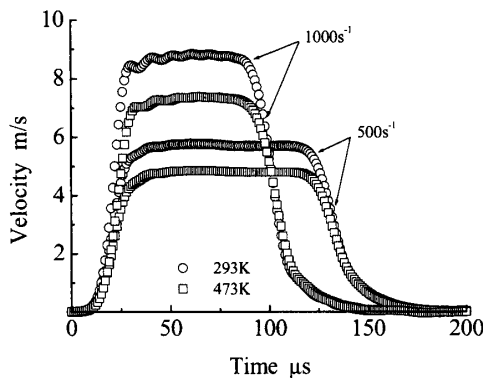
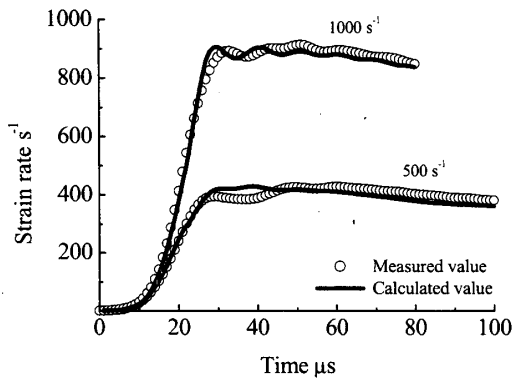
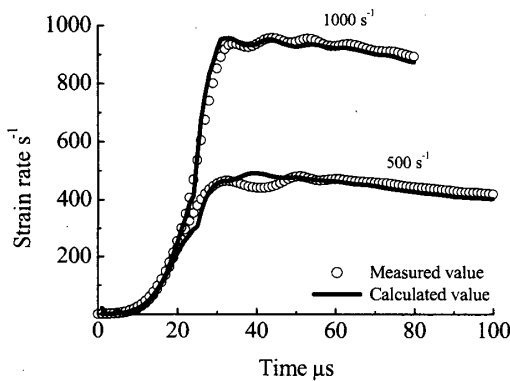


Fig.9 Impact velocities



(a) 293K



(b) 473K

Fig.10 Measured and calculated strain-rate waves

Table 5 Determined material constants of Eq. (4)

$P_1 (s^{-1})$	$P_2 (K/MPa)$	$P_3 (K)$	$P_4 (MPa \cdot K)$
$1.38 \times 10^5$	48.37	$2.21 \times 10^4$	$1.04 \times 10^6$

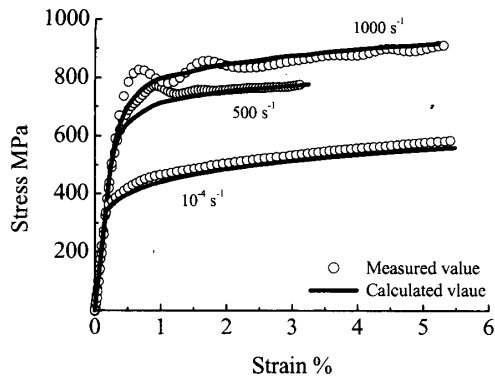
いて塑性ひずみ  $\epsilon_p$  を零とした次式より得られる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= K\alpha^n \\ E &= \frac{\sigma_y}{\alpha} = K\alpha^{n-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

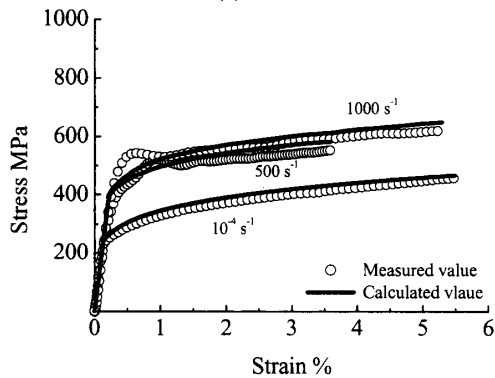
式(10)に含まれる材料定数の値を、293Kおよび473Kの静的試験結果より、線形最小二乗法を用いて決定した。得られた材料定数を表2に、また、決定された値による各材料定数の温度に対する変化を式(10)より求め、図6中にそれぞれ実線で示す。さらに、式(9)より各温度下における静的応力-塑性ひずみ関係を求め、測定値とともに図7に示す。図8には式(11)より得た降伏応力および縦弾性係数の計算値と測定値の比較を示す。なお、図8に比較のために示した縦弾性係数の測定結果は、同値がひずみ速度に依存しないとして、図2(b)に示した動的応力-ひずみ関係より得た値である。図6、7および8より、決定された各材料定数および応力-塑性ひずみ関係の近似式は、測定値をよく近似することがわかる。以後、式(9)および表2の値を用いて材料の静的応力-塑性ひずみ関係を表す。

4.2 材料定数の決定 式(4)に示す、ひずみ速度および温度依存性をともに考慮した動的構成式に含まれる未知の材料定数  $P_1 \sim P_4$  を、衝撃圧縮試験結果および式(9)から得られる静的応力値を用いて、非線形最小二乗法により決定する。

HPB試験による衝撃圧縮時において、図1に示す試験装置の入力棒の左端に作用した衝撃端速度波形の測定結果を図9に示す。なお、同結果は一次元伝ば理論に基づき、入力棒に貼付したひずみゲージで測定される入射ひずみ波形  $\epsilon_i$  に入力棒中の応力波伝ば速度  $C_0$  を乗じるこ



(a) 293K



(b) 473K

Fig. 11 Measured and calculated stress-strain curves

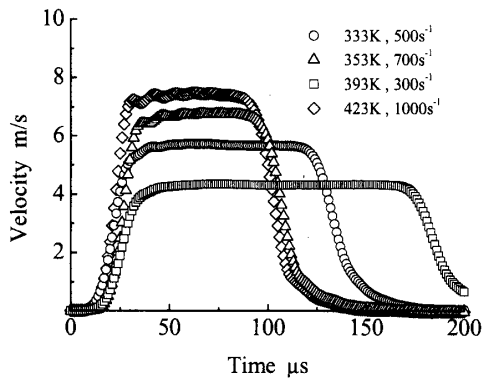


Fig. 12 Impact velocities at various conditions

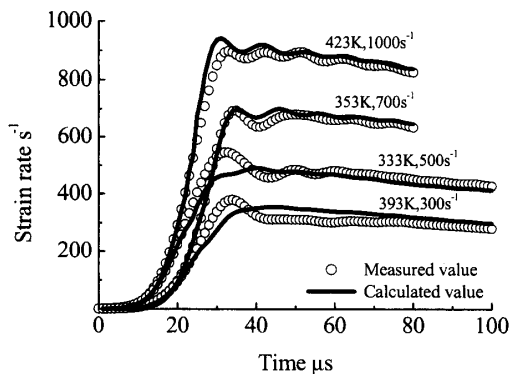


Fig. 13 Measured and calculated strain-rate waves at various conditions

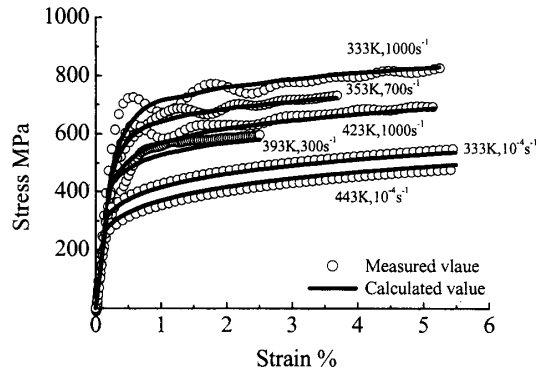


Fig. 14 Measured and calculated stress-strain curves at various conditions

とにより求めた。また、同衝撃端速度に対して試験片に生じたひずみ速度波形を図10に示す。以上の測定結果に、弾塑性波伝ば解析の結果が一致するように非線形最小二乗法で式(4)に含まれる未知の材料定数を決定する<sup>(8)</sup>。なお、弾塑性波伝ば解析は、式(6)に示す弾塑性波伝ばの基礎式を特性曲線法<sup>(11)</sup>を用いて解くことにより行った。解析の対象は図1に示すHPB試験装置における入力棒、出力棒および試験片であり、入力棒左端に図9に示した衝撃端速度波形が作用するとして解析を行った。

材料定数を決定するための弾塑性波伝ば解析に用いた試験装置の入出力棒および試験片の諸元を表3および表4にそれぞれ示す。なお、試験中の温度は一定とするため、それぞれの解析において縦弾性係数の値も一定とし、その値は式(11)より求めた。また、実際の試験装置と解析モデルとは入出力棒の長さが異なるが、解析を行った範囲では反射波の影響を受けないため試験片両端に作用する負荷の状態は同一とみなせる。

以上のような条件下で、図10に○で示す温度が293Kおよび473K、最大塑性ひずみ速度が約500s<sup>-1</sup>、1000s<sup>-1</sup>であるひずみ速度波形の測定結果、さらに、式(9)より得られる同温度下での静的応力-塑性ひずみ関係を用い、図9に示す衝撃端速度波形を入力条件として解析を行い、非線形最小二乗法により材料定数P<sub>1</sub>~P<sub>4</sub>を決定した。得られた材料定数の値を表5に示す。また、材料定数決定時における弾塑性波伝ば解析によるひずみ速度波形の計算結果を図10に実線で示す。同図より計算値は測定値をよく近似しており、材料定数の決定が良好に行えたことが確認できる。

### 5. 動的構成式決定結果の検討

ひずみ速度波形の測定結果をもとに以上で決定した動的構成式を用いて材料の動弾塑性変形挙動を求め、提案する構成式および決定した材料定数の妥当性を確認する。動的構成式より得た293Kおよび473Kにおけ

る応力-ひずみ関係をそれぞれ測定結果とともに図 11 に示す。なお、塑性ひずみ速度が  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  の応力-ひずみ関係の計算値は式(9)に示した静的値の近似式ではなく、決定した動的構成式より得た値である。図 11 より、計算結果は測定結果をよく近似していることがわかる。

次に、得られた動的構成式が、材料定数を決定した条件とは異なる温度およびひずみ速度下においても適用可能であることを確認する。すなわち、種々の条件下で HPB 試験を行い、得られた測定結果と決定した動的構成式による計算結果とを比較する。

HPB 試験において種々の条件下で測定した衝撃端速度波形の結果を図 12 に、また、同衝撃端速度により試験片に生じたひずみ速度波形の測定結果を図 13 に○で示す。図 12 に示す衝撃端速度波形の測定結果を入力条件として、4章で決定した動的構成式を用い表 3 および 4 に示す条件下で特性曲線法による弾塑性波伝ば解析を行った。解析より得られた試験片に生じるひずみ速度波形を図 13 に実線で示す。同図より、いずれの条件においても、解析結果は測定結果によく一致している。

図 14 には種々の温度およびひずみ速度における応力-ひずみ関係の測定結果および動的構成式による計算結果を示す。なお、塑性ひずみ速度が  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  における計算結果は、先と同じく動的構成式より得た結果である。図 14 より、いずれの条件下においても決定した動的構成式は、試験片の応力-ひずみ関係をよく表している。

以上の結果より、決定した動的構成式は、 $10^{-4}\text{s}^{-1}$  から  $10^3\text{s}^{-1}$  までの広い塑性ひずみ速度域および 293K から 473K までの温度下において、炭素鋼の変形挙動をよく表し得ることが確認できる。

## 6. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 温度およびひずみ速度依存性をともに表現し得る炭素鋼を対象とした簡潔な動的構成式を提案するとともに、温度に対する依存性を考慮した静的な応力-塑性ひずみ関係を表す式を示した。
- (2) 提案する動的構成式に含まれる未知の材料定数を決定する方法を示すとともに、各種温度およびひずみ速度下における一軸荷重の圧縮試験より、材料定数の値を実際に決定した。

(3) 決定された動的構成式を用いて、種々の温度およびひずみ速度下で弾塑性波伝ば解析を行い、得られた計算値と測定値を比較し、いずれの条件下でも両者はよく一致することを確認した。

## 参考文献

- (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, 日刊工業新聞社, (1988), 64-70
- (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) 石川皓一・谷村眞治, ひずみ速度敏感性, ひずみ速度履歴効果, 温度依存性および加工硬化を表す一構成式, 機論, **58-554, A**(1992), 109-114
- (6) 放生明廣・茶谷明義・佐々木芳彦, 広いひずみ速度範囲における炭素鋼の構成式, 材料, **34-387**(1985), 1400-1405
- (7) 放生明廣・茶谷明義・米谷茂, ひずみ速度依存性を考慮した構成方程式について, 材料科学, **22** (1985), 90-96
- (8) 立矢宏・放生明廣・安高聡・茶谷明義, 非線形最小二乗法による炭素鋼の動的構成式推定, 機論, **59-563, A**(1993), 1720-1725
- (9) 例えば文献(2)の 45-49
- (10) 中川徹・小柳義夫, 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, (1982), 95-124
- (11) 例えば村上碩哉・室田忠男・神馬敬, 金属材料の縦衝撃によるひずみ速度効果の測定精度, 機論, **39-318, 1**(1973), 556-564
- (12) 茶谷明義, 衝撃強度設計(11), 機械の研究, 養賢堂, **42-3**(1990), 435-440
- (13) J. P. ホールマン, 伝熱工学(上), プレイン図書出版株式会社, (1993), 88-93
- (14) 例えば日本塑性加工学会, 高エネルギー速度加工, コロナ社, (1993), 14-16
- (15) 宮川大海・坂木庸晃, 金属学概論, 朝倉書店, (1998), 136-137