金属材料の高温・高ひずみ速度での変形挙動に関する研究：炭素鋼およびマグネシウム合金について

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2017-10-05
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 新本, 哲平
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26906

氏　　名	新本　哲平
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 1051 号
学位授与の日付	平成２０年９月２６日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第４条第１項)
学位授与の題目	金属材料の高温・高ひずみ速度での変形挙動に関する研究 (炭素鋼およびマグネシウム合金について)
論文審査委員（主査）	立矢　宏（理工研究域・教授）
論文審査委員（副査）	放生　明廣（理工研究域・教授），門前　亮一（理工研究域・教授）， 細川　晃（理工研究域・教授），米山　猛（理工研究域・教授）

Abstract

This study clarifies the deformation behaviors of carbon steels and magnesium alloys at elevated temperatures and high strain-rates. Additionally, the behaviors of the carbon steels are expressed by constitutive equations. Firstly, the study proposed the simple method to determine a constitutive equation with both temperature and strain-rate dependencies by statistical procedures. The method expresses the constitutive equation by polynomial and determines its degrees by an information criterion. The coefficients of the polynomial are determined by approximating measured values with linear least squares. The study demonstrated that the method can easily obtain the constitutive equation in the strain-rate range from 10^{-4} to 1000 s^{-1} and the temperature range from about 293 to 400K, where the deformation of the carbon steels show simply dependences to the temperature and strain-rate variances. Next, the study confirmed the carbon steels exhibit the abrupt change of the temperature dependence by the influence of blue brittleness. The polynomial constitutive equation as above described hardly expresses that phenomenon. Thus, the study proposed the static constitutive equation that can exhibit the influence of blue brittleness. The proposed equation has two terms; the one shows unaffected deformations and the other shows affected one by blue brittleness. The unknown material constants of the proposed equations were determined from measured results and its availability was validated. The study furthermore proposes dynamic constitutive equation that can reveal the deformation behaviors of the carbon steels over wide strain-rate and temperature ranges involving the blue brittleness range. The equation was derived by considering the mechanism of the dislocation based on metallic physics. The unknown material constants involved in the equation were determined from the measured results and its validities were shown. Finally, the study investigated both the compressive and tensile deformation behaviors of representative magnesium alloys at wide strain rate and temperature ranges. The magnesium alloys exhibit low temperature dependence. Furthermore, the yield stresses caused under the tensile load exhibit about twice as high as those under compressive load over wide strain rate and temperature ranges.

金属材料の変形挙動は，ひずみ速度および温度に依存する場合が多く，これらを構成式として表すことは機械や構造物の衝撃負荷に対する変形解析，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．そこで従来から転位の運動学的考察などに基づき，いくつかの動的構成式が検討されてきた．しかし，それらの多くは式形が複雑であり，また，式中に含まれる材料定数の決定も容易でなく実用的なものは少ない．

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って，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，式中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などより容易に決定可能とすることが望まれる．

そこで，先に測定結果を近似することで構成式に含まれる材料定数を決定する簡便な方法などが検討されてきたが，構成式形の決定が容易ではなかった．さらに実用的な観点からは，材料の変形挙動が温度やひずみ速度に対して単純に減少，増加する範囲内であれば，構成式形の検討を必要とせず，通常の材料試験結果を直接近似し構成式を得る簡便な手法が有用である．そこで本論文では，まず，温度およびひずみ速度依存性を有する動的構成式を材料の変形挙動をよく表すように統計学的手法で決定する，金属学的な考察を必要としない方法を提案している．

また，金属材料では，通常，ひずみ速度の上昇に伴い変形応力が増加し，温度の上昇に対しては変形応力が低下することが知られている．しかし，延性材料においては，温度が上昇し，ある温度域に達すると変形能の低下を生じる場合がある．本論文で対象とする炭素鋼においても，比較的高温下のある範囲で引張り強さが上昇し伸びと絞りが低下することが知られており，同現象は青熱脆性と呼ばれている．青熱脆性により材料は通常とは逆の温度依存性を示すため，例えば加工力の低減を目的とした温間鍛造等では，青熱脆性が生じる温度域を避ける必要がある．したがって，適切な加工条件の決定のために，青熱脆性の影響を予測することは重要であるが，動的な範囲も含め青熱脆性の影響を表し得る簡便な構成式はこれまで見当たらない．また，本論文で提案する上述の多項式を用いた構成式では，一時的な変形応力の増減を生じる複雑な変形挙動を表すことは困難である．そこで，本論文では，炭素鋼を対象とした静的な応力－ひずみ関係を表す構成式として，応力を青熱脆性の影響を含む項および含まない項とに分け定式化することで，青熱脆性域を含めた広い温度下に適用可能な式を提案し，また以前提案した動的構成式を基に，転位論および実際の変形挙動を考察することにより，炭素鋼を対象として青熱脆性の影響を表し得る温度およびひずみ速度依存性を考慮した動的構成式の形を提案するとともに，式中の材料定数の決定方法を確立する．また，提案するそれぞれの構成式が青熱脆性を含む広い温度域において適用可能であることを示す．

さらに本論文では，以上で構築する高温・高ひずみ速度域における金属材料の変形挙動測定法を用いて，各種条件下におけるマグネシウム合金の応力－ひずみ曲線を測定する．マグネシウムは資源が豊富であり，減衰性，被切削性がよく，構造用材料中最も軽い材料であることから様々な機械部品への利用が望まれている．特に自動車の分野においては，

軽量化による燃費の向上などの理由により，鉄やアルミニウムの部品からマグネシウム合金へと転換が始まっている．今後，マグネシウム合金の転用に際して，様々な特性の解明が求められるが，現状では衝撃，温度変化に対する材料特性の研究は少ない．そこで，本論文ではマグネシウム合金を対象として，常温下で静的圧縮および引張試験を，また広い温度域において静的および衝撃圧縮試験，さらに高温下において引張試験を行うことで，その変形挙動を明らかにしている．

本論文は6章から構成されており，その要旨は以下のとおりである．

第1章は，“緒論”として研究の目的と背景を述べるとともに，本論文の構成を示している．

第2章は，“温度およびひずみ速度依存性を考慮した多項式形構成式”と題し，ひずみ速度および温度依存性を考慮した動的構成式を金属学的な考察を行わず，統計的手法を用い簡便に決定する手法を提案している．具体的には，まず，構成式の形を次式で示す多項式としている．

$$\dot{\varepsilon}_p = \sum_{i=0}^{n} P_i \left[\frac{T\sigma_{ov}\left(\varepsilon_p\right)}{10^4} \right]^i \qquad (1)$$

ここで，$\dot{\varepsilon}_p$，ε_p，T，P_iはそれぞれ塑性ひずみ速度，塑性ひずみ，絶対温度および未知の材料定数である．また，$\sigma_{ov}\left(\varepsilon_p\right)$は塑性ひずみの過応力となり次式で表される．

$$\sigma_{ov}\left(\varepsilon_p\right) = \sigma_d\left(\varepsilon_p\right) - \sigma_s\left(\varepsilon_p\right) \qquad (2)$$

$\sigma_d\left(\varepsilon_p\right)$，$\sigma_s\left(\varepsilon_p\right)$は塑性ひずみに対する動的および静的応力を表している．次数が大きいほど式(1) は測定値を精度良く近似する．しかし，同時に誤差までも近似してしまい，計算が不安定になる．そこで，測定値には偶然誤差が含まれているとして，赤池の情報量規準 AIC を用い適切な次数を決定する．さらに，決定された次数の式(1)を用い，線形最小二乗法で測定結果を近似し未知の係数 P_i を得る．本章では式(1)の構成式を実際に決定する測定値を得るための金属材料の変形挙動を測定する，常温から高温の範囲における静的および衝撃圧縮試験装置について示すとともに，同装置を用いて炭素鋼の応力－ひずみ関係を測定した．その結果，従来より知られているように，ひずみ速度度ともに炭素鋼の応力値は上昇し，また，温度に対しては低下した．ただし，400K 付近で，温度の上昇とともに炭素鋼の応力値が上昇する青熱脆性の影響が生じることを確認した．そこで，青熱脆性の影響が生じる範囲を避けて，炭素鋼の変形挙動が温度およびひずみ速度に対して単調な傾向を示す，温度が 293 から 400K，ひずみ速度が 10^{-4} から $10^{3}s^{-1}$ の範囲の測定結果を用い，上述の手法で炭素鋼の温度およびひずみ速度依存性を考慮した多項式形動的構成式を決定した．得られた構成式による計算値は測定値とよく一致し，その妥当性が確認された．

第3章は，“青熱脆性を考慮した静的構成式”と題し，第2章では対象としなかった青熱脆

性の影響を表し得る静的構成式を検討している．まず，静的な変形挙動に関して炭素鋼の青熱脆性を考慮した構成式の確率を検討した．その結果，構成式を青熱脆性の影響を受けない成分と，受ける成分に分けて，それぞれを表す式を決定することを提案している．青熱脆性の影響を受けない式には従来から知られている指数則を，また，青熱脆性の影響を表す式には指数関数を用い，これらの和として次式を導いている．

$$\sigma_{sall} = K(\varepsilon_p + \alpha)^n + C_1 \exp\left[C_2\left(T - T_0\right)^2\right]\varepsilon_p{}^{C_3} \qquad (3)$$

上式の第 1 項は青熱脆性の影響を受けない成分，第 2 項は青熱脆性の影響を受ける成分であり，σ_{sall} は静的応力値，K，α，C_1，C_1，C_1，T_0 は材料定数である．

SS400 および S45C 炭素鋼に関して常温から高温下までの静的圧縮試験結果より得た応力－ひずみ曲線の測定結果を用いて，式(3)中の未知の材料定数を非線形最小二乗法により決定して構成式を導き，得られる計算結果と測定結果とを比較し，常温から 700K 付近の広い温度範囲における静的負荷状態において両者はよく一致することを示し，その妥当性を確認している．

第４章は“青熱脆性を考慮した動的構成式”と題して，青熱脆性が生じる条件含む広い温度域で炭素鋼の動的変形挙動が表現可能な構成式を提案している．まず，転位論に基づく金属物理学的考察に基づき，青熱脆性現象が表現可能な炭素鋼の動的構成式形として次式を提案している．

$$\dot{\varepsilon}_p = \varepsilon_0 \exp\left\{\left(A_0 + A_1\right) - \frac{D}{T\left(\sigma - \sigma^*\right)}\right\} \qquad (4)$$

ε_0 は単位ひずみ速度 $1s^{-1}$，σ は動的応力，σ^* は背応力を表し，A_0，A_1，D は材料定数である．A_0，A_1 は，それぞれ青熱脆性の影響を受けない項，受ける項を表している．SS400 炭素鋼を対象に，A_1 に関して測定結果から式形を導くとともに，材料定数の値を決定し，測定結果と比較したところ，式(4)は青熱脆性が生じる温度を含む広い範囲で炭素鋼の動的な変形挙動を表すことができることを確認している．

第５章は“高温下におけるマグネシウム合金の強度特性”と題し，複数の代表的なマグネシウム合金を試供体として，以上の章で用いた測定方法を利用することで，常温から高温までにおける静的および動的な圧縮・引張応力－ひずみ曲線を測定し，その変形挙動を明らかにしている．すなわち，圧縮負荷に対する変形挙動に関しては室温から高温までにおける，ひずみ速度が 10^{-4} から $1000s^{-1}$ までの範囲で，また，引張負荷に対しては，室温における静的変形挙動，さらに，高温下における動的変形挙動を測定した．その結果，いずれのマグネシウム合金も室温下では圧縮荷重下において，応力塑性ひずみ関係のひずみ速度依存性が弱く，高温下においては依存性を有することを確認している．ただし，降伏応力の変化は少ないことを示している．また，マグネシウム合金の塑性ひずみに対する圧縮応力は温度とともに低下し，特に，500～600K 付近においては急激に変化することを示している．ただし，高ひずみ速度下では減少傾向が緩やかになることを示している．引張荷重に対しては，圧縮荷重下と異なり，室温下においてもひずみ速度依存性が表れ，降伏応力，変形応力が，ひずみ速度とともに増加することを確認している．また，引張荷重に対する

伸びは，ひずみ速度の上昇に対しては顕著に増加し，温度に対しても増加はみられるが，ひずみ速度に対する変化に比べれば緩やかであることを示している．さらに，引張に対する降伏応力が，圧縮に対する値に比べ，広い温度，ひずみ速度範囲において約 2 倍となることが確認している．

第６章　結論

第６章は，本論文の結論であり得られた結果を要約して述べている．

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し，平成 20 年 7 月 29 日，第 1 回学位論文審査委員会を開催し，提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した．平成 20 年 7 月 30 日の口頭発表後，第 2 回学位論文審査委員会を開催し，慎重に協議の結果，以下の通り判定した．

本論文では，広い温度およびひずみ速度域で炭素鋼の変形挙動を測定し，同結果より室温付近から 400K 程度の高温下において，ひずみ速度 10^{-4} から $10^{3}s^{-1}$ 付近までの炭素鋼の動弾塑性変形挙動を表す多項式形の構成式を統計処理より簡便に導く方法を提案している．つぎに，400K 以上の温度において炭素鋼の強度が一時的に増加する青熱脆性現象を表現可能な静的弾塑性変形に関する構成式を確立している．ついで，ひずみ速度が $10^{3}s^{-1}$ 付近までの動弾塑性変形に関しても同様に青熱脆性の影響を表現可能な動的構成式を金属物理学的考察から導き，その有用性を確認している．さらに，マグネシウム合金の広い温度およびひずみ速度下における圧縮・引張変形挙動を測定し，その温度およびひずみ速度依存性を明らかにするとともに，圧縮強度と引張強度の違いについても検討している．

以上のように本論文は広い温度，ひずみ速度域で炭素鋼およびマグネシウム合金の変形挙動を測定して，炭素鋼の実用的な構成式決定法を提案し，また，マグネシウム合金の変形挙動の特徴を明らかにしており，その成果の工業への貢献度は高いと予想され，学術的価値も高いと評価できる．よって，本論文は博士（工学）論文に値すると判定する．