

鋼の引張変形時歪分布の検討と構成式による 均一伸び決定

橋口 耕一*・坂田 敬*²

Analysis of Strain Distribution during Tensile Deformation of Sheet Steel and Determination of
Uniform Elongation Using a Constitutive Equation

Koichi HASHIGUCHI and Kei SAKATA

Synopsis : Uniform strain distribution in a tensile specimen during an initial stage of tensile deformation of sheet steel breaks down into the localization of strain after the maximum load point corresponding to uniform elongation. These deformation behaviors were analyzed by a simplified constitutive equation derived from a thermally activated process of dislocation movement. The average deformation behavior measured at fixed gage length is co-related with the local deformation behaviors by means of the equality of load applied on a tensile specimen. Relation between local strain and local strain rate derived from this co-relation exhibits an U-shaped curve which goes through a point of average strain and strain rate, which composes a straight line at fixed strain rate on this strain and strain rate diagram. The U-shaped curve becomes tangent to the straight line expressing average strain and strain rate relation at a strain corresponding to the uniform elongation. Development of strain fluctuation imposed at a local point was analyzed on this diagram. At smaller average strain which corresponds to the left half of the U-shaped curve, the local strain higher than the average exhibits local strain rate lower than the average, which results in a convergence of strain fluctuation and thus uniform deformation. On the other hand, at higher average strain, the local strain higher than the average exhibits local strain rate higher than the average, which results in a divergence of strain fluctuation and the development of localized deformation. Uniform elongation is defined as the strain at the boundary of convergence and divergence of local strain fluctuation.

Key words: tensile test; uniform elongation; constitutive equation; strain distribution; uniform deformation; localized deformation.

1. 緒言

自動車用の薄鋼板やアルミニウム合金板など加工用途に使用される金属板に関する研究開発の目的は過去から現在に至るまで一貫して高強度化、成形性向上であるといっても過言ではない。対象となる特性の強度と成形性を代表する延性はほとんどの場合1軸引張で得られる応力-歪曲線に基づいて評価されている。一つの応力-歪曲線は降伏応力、引張強さ、加工硬化指数 (n 値)、均一伸び、局部伸び、全伸びなど多くの情報を与えるため引張試験は非常に有用な試験といえる。

これら諸特性の中で均一伸びは公称応力-公称歪曲線上の最大応力点つまり引張強さに対応する伸びとして定義される。この伸び以下では試片標点距離内どの位置でも歪は均一であるがこの伸びを越えると標点距離内で歪が不均一になり破断に至る。つまり均一伸びは引張強さを定義する歪量であると同時に歪の不均一化 (くびれ) 開始点として破断伸びに影響を与える重要なパラメータである。従来、くびれは塑性不安定現象として力学的観点^{1,2)}からもっぱら議論されてきた。その開始条件は真応力、真歪をそれぞれ σ , ε として $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ で表され、応力-歪曲線を n 乗硬化

則で近似した場合均一伸びは n 値に等しくなる³⁾。ただこれらの扱いでは引張変形時均一伸び以下の伸び領域ではいづれの部位の歪も同一となり、また均一伸び以上の伸び領域では各部位の歪に大きな差が生ずる理由を直感的に把握することが困難である。均一伸びの解釈に関し木原³⁾は材料の変形中標点距離内に不均質が発生した後の変形を歪速度の違いによって説明することを試みているが、定性的説明にとどまっている。

本論文では均一伸びを定量的に把握することを目的に鋼の引張変形中の標点距離で測定される通常の応力、歪 (平均値) と標点距離内引張方向各位置の応力、歪 (局所値) の関係を実験および応力-歪-歪速度の関係を定義する熱活性化過程の構成式を用いた解析により詳細に調べた。その結果構成式を用いることにより均一伸びを定量的に把握することが可能となった。

2. 引張変形時標点距離内の歪、応力分布

引張変形中の標点距離内各部の歪変化を調べるため0.7 mm厚極低炭素冷延鋼板 (YS/130 MPa, TS/285 MPa, EI/52%, UEI/27.5%) から圧延方向にJIS5号引張試片を切り出し10

平成14年4月22日受付 平成14年6月22日受理 (Received on Apr. 22, 2002; Accepted on June 22, 2002)

* 川鉄テクノリサーチ (株) (Kawasaki Steel Techno-research Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

* 2 川崎製鉄 (株) 技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

tonf引張試験機による引張試験を行った。JIS5号試片（標点距離 50 mm）を速度 10 mm/min で引張り、荷重、伸びデータを採取すると同時に 5 mm 間隔のケガキ付き試片を引張り途中で止めケガキを拓本採取同様の方法で写取り変形成程での歪分布変化を測定した。

引張変形時の標点距離内歪分布の変化を Fig. 1 に示す。伸びが均一伸びに達するまでは標点距離端部の歪が若干低い点を除けば平坦な歪分布となっている。伸びが均一伸びを越え局部伸びの領域になると標点距離端部の歪はほとんど変化しないまま標点距離中央部に変形が集中し、その歪が増加し最終的に破断に至る。

ケガキ線で区分した各部局所の真応力、真歪を σ, ϵ とし、標点距離 50 mm で測定した平均真応力、平均真歪を $\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}$ とすれば同一時点では試片長手方向どの位置においても荷重 ($P = \sigma \cdot A = \bar{\sigma} \cdot e^{-\epsilon} \cdot A_0$, A_0 は初期、変形中断面積) は同一であるから局所と平均の間には(1)式が成立する。なお(1)式は公称応力を表現している。

$$\bar{\sigma} \cdot e^{-\bar{\epsilon}} = \sigma \cdot e^{-\epsilon} \dots\dots\dots (1)$$

上記引張りで得られた平均応力、平均歪と Fig. 1 の局所歪から(1)式により局所応力を求めた。平均および局所の応力-歪関係を Fig. 2 に示す。図では応力、歪とも対数プロットし、同一位置の時間変化を実線で、また同一時点における各位置の状態を破線で結び示した。平均応力、平均歪の関係は均一伸びに相当する真歪（以下均一伸び歪とする）0.243 までは直線関係にあり、局部伸び領域では歪増加に伴い平均応力は増加した後減少し破断に至る。一方局所に注目すると均一伸び歪までは平均の挙動と同じ直線上 (n 乗硬化則) を推移するが、局部伸び領域では歪増加が少ないまま応力が急激に減少する部位（標点距離端部近傍）、均一伸びまでの直線の延長上を推移し応力、歪ともに n 乗硬化則に従い増加する部位（標点距離中央部）と標点距離内の変形状態に大きな差が生ずる。

Fig. 2 に示した平均および局所歪の最大、最小点（標点距離中央と端部）の応力、歪の時間変化を Fig. 3 に示す。平均の歪は時間にほぼ比例して増加するのに対し、標点距離端部の最小歪部では 180 s 以上で歪増加が停滞し、一方標点距離中央部の最大歪部では急激に歪が増加する。このことを各部位の歪速度変化という観点で見ると均一伸び歪以下の領域では標点距離内の例えばつかみに近く局所歪が平均歪より小さい部分も含めいづれの局所においても歪速度は平均歪速度に同調する状態で変化するが、局部伸び領域では局所歪の差が拡大する、つまり標点距離端部の歪速度は減少し 0 s^{-1} に収斂する一方標点距離中央部では歪速度が急激に増加し、歪速度の不均一（発散）が生ずる。この変形挙動をより詳細に解析するため次章で応力、歪、歪速度の関係を記述する構成式を用いて検討した。

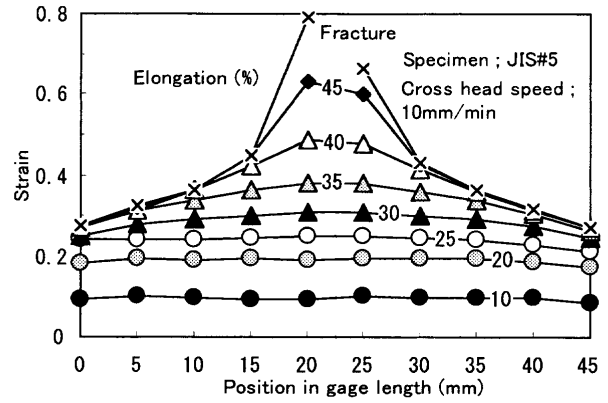


Fig. 1. Variation of strain distribution during tensile deformation.

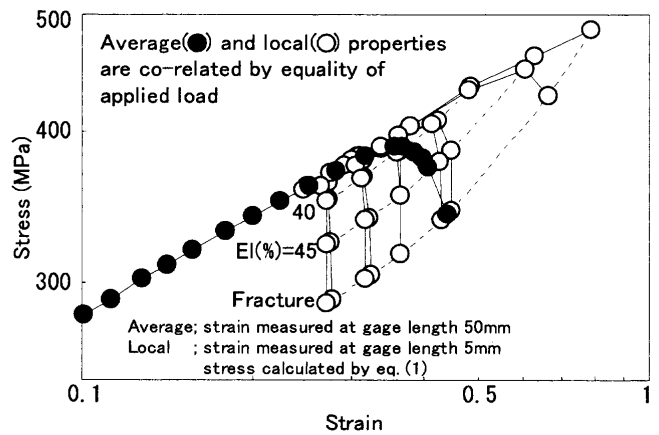


Fig. 2. Variation of average and local stress-strain relation during tensile deformation.

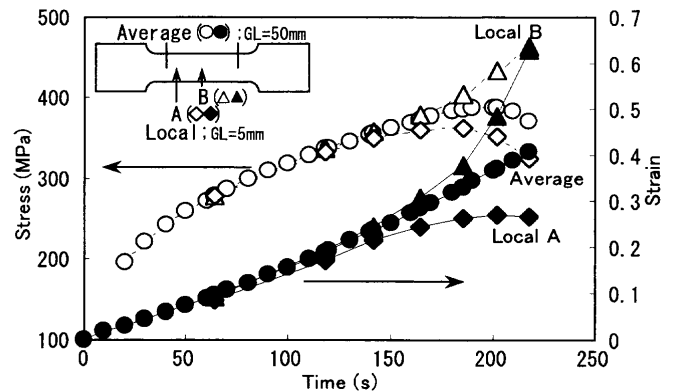


Fig. 3. Time variation of stress and strain for average and local deformation.

3. 構成式による変形挙動の解析

3.1 構成式の導出と変形

本実験の温度、歪速度範囲における鋼の変形挙動は一般的に転位運動の熱活性化過程に支配される。転位の運動の障害を越えるための活性化エネルギーを H とすれば歪速度 $\dot{\epsilon}$ は(2)式で表される^{4,5)}。

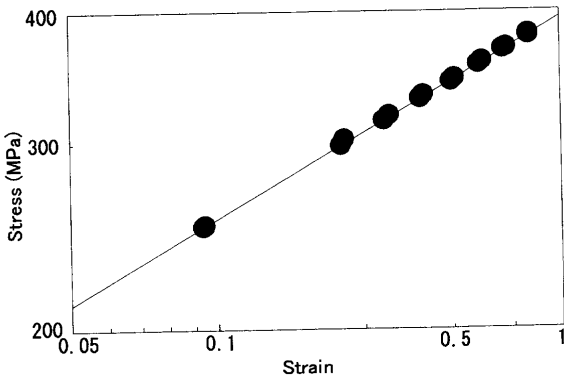


Fig. 4. Relationship between strain and stress obtained by cross-head stop test.

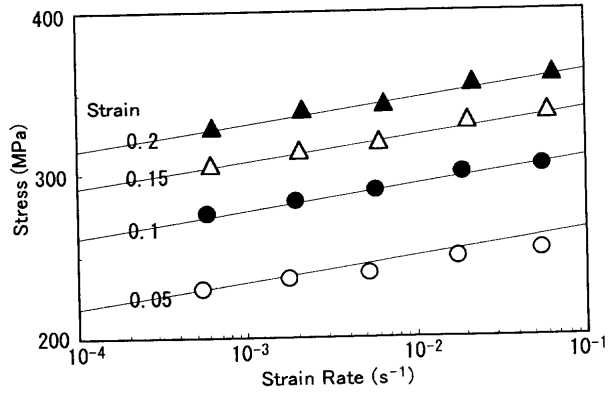


Fig. 5. Relation between strain rate and stress at fixed strain.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp(-H/kT) \dots\dots\dots (2)$$

k はボルツマン定数、 T は温度で、 $\dot{\epsilon}_0$ は転位密度などを含む項でありここでは定数とした。活性化エネルギー H は谷村⁵⁾に従い(3)式で表現される。

$$H = H_0 - v^*(\sigma - \sigma^*) \dots\dots\dots (3)$$

ここで H_0 は全活性化エネルギー、 v^* は活性化体積、 σ^* は応力の非熱的成分である。(3)式を(2)式に代入、整理し(4)式を得る。

$$\sigma = \sigma^* + K \cdot \ln(\dot{\epsilon}/B) \dots\dots\dots (4)$$

$$K = kT/v^* \dots\dots\dots (5)$$

$$B = \dot{\epsilon}_0 \cdot \exp(-H_0/kT) \dots\dots\dots (6)$$

応力の非熱的成分を後述するように n 乗硬化則で表現($\sigma^* = C \cdot \epsilon^n$)し最終的に(7)式を得る。

$$\sigma = C \cdot \epsilon^n + K \cdot \ln(\dot{\epsilon}/B) \dots\dots\dots (7)$$

式の右辺第1項は応力の非熱的成分、第2項は歪速度による応力増分で、 $\dot{\epsilon} = B$ の場合に第2項は0、つまり応力は第1項に等しくなり、 B の値は非常に小さいことが予想される。

3.2 パラメータ決定

(7)式のパラメータ決定のため引張り途中のクロスヘッド停止試験と歪速度を変更した引張試験を行った。

まず10 mm/minで引張り途中種々の歪量でクロスヘッドを止め応力が低下し一定になるまで保持した後引張りを再開した。このクロスヘッド停止試験で得られた応力(非熱的成分)-歪関係をFig. 4に示す。図から明らかなように応力、歪関係は n 乗硬化則で表現可能である。回帰計算により $C = 476.48$ MPa, $n = 0.272$ を得た。友田ら⁶⁾は一定温度での 10^{-9} s⁻¹における変形応力を求めるためクロスヘッド停止試験を行い、IF鋼では360 ksのクロスヘッド停止保持時間が必要で、またこのようにして求めた 10^{-9} s⁻¹の変形

応力は温度依存性があり、クロスヘッド停止試験により非熱的応力を求めることは難しいと述べている。本実験での停止時間は3.6 ks以下と友田らに比べはるかに短時間で、さらに室温におけるデータであり温度の影響も考慮していないため非熱的成分とするには無理がある。そこでFig. 4の応力を非熱的応力ではなく次の結果に示すように $\dot{\epsilon} = B$ ($\approx 10^{-5}$ s⁻¹)における応力と解釈する。

速度を3, 10, 30, 100および300 mm/minと変えた引張試験を行い、得られた真歪0.05, 0.1, 0.15, 0.2における真応力と歪速度の関係をFig. 5に示す。同一歪量における真応力と歪速度の対数は歪速度 0.1 s⁻¹以下ではほぼ直線関係にあり(7)式が妥当であることを示している。Fig. 5のデータを上記Fig. 4の応力を考慮しながら(7)式で回帰し $K = 7.088$ MPa, $B = 4.056 \times 10^{-5}$ s⁻¹を得た。これらの値を用い(7)式で計算した応力、歪速度の関係をFig. 5中に実線で示したが、低歪量0.05の高歪速度側で計算と実測応力の差が若干大きくなる以外は計算応力が実測応力をかなりの精度で表現している。

(5)式に得られた K 値を代入し、活性化体積 v^*/b^3 (b はパーガースベクトルで 2.5×10^{-10} m)を計算し36.5を得た。一方加藤⁴⁾によれば(6)式の右辺係数 $\dot{\epsilon}_0$ は ρ を運動転位密度 $= 10^{12}$ m⁻², v_D を原子の熱振動数 $= 10^{12}$ s⁻¹とし $\dot{\epsilon}_0 = \rho v_D b^2$ で表される。これらの値と B 値を用い(6)式から全活性化エネルギー H_0 を計算し 8.56×10^{-20} J $= 0.53$ eVを得た。これらの活性化体積、全活性化エネルギーともに辛島ら⁷⁾の実験データに近く、本回帰で得た K 値、 B 値はともに妥当といえる。

3.3 平均変形挙動と局所変形挙動の関係解析

引張変形時の歪、歪速度の平均値と局所値の関係を(7)式の構成式を用いて検討する。平均の構成式と局所の構成式を(1)式に代入して(8)式を得る。

$$\{C \cdot \bar{\epsilon}^n + K \cdot \ln(\bar{\dot{\epsilon}}/B)\} e^{-\bar{\epsilon}} = \{C \cdot \epsilon^n + K \cdot \ln(\dot{\epsilon}/B)\} e^{-\epsilon} \dots\dots (8)$$

平均歪速度を引張り速度10 mm/minに相当する 0.002 s⁻¹とし平均歪0.1, 0.2, 0.25, 0.4 (図中○印)において(8)式を満

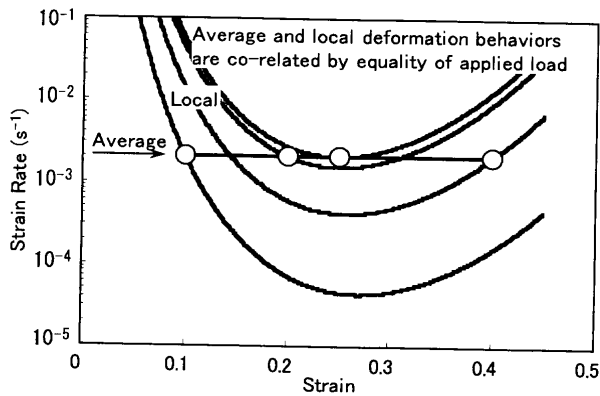


Fig. 6. Relation between average and local deformation behavior calculated by the constitutive equation.

たす局所の歪，歪速度の関係を計算して Fig. 6 に示す。図の曲線は通常の引張り試験で得られる標点距離 50 mm における平均の歪，歪速度（図中歪速度 0.002 s^{-1} の直線上を推移）に対し，荷重同一性により標点距離内局所で許される歪-歪速度の関係を与える。局所歪-局所歪速度の関係は平均の歪-歪速度を通り下に凸の U 字状曲線上にあり，平均歪の増加に伴いこの曲線全体が低平均歪領域では高歪速度側に移行し，その後高平均歪領域では再び低歪速度側に移行する。両者の境界でこの曲線は歪速度 0.002 s^{-1} の直線に歪約 0.25 で接する。また平均および局所の歪と歪速度の関係は低歪領域ではこの曲線の左半分つまり右下がりの曲線上にあり，高歪領域では曲線の右半分，つまり右上がりの曲線上にプロットされる。このことは次に示すように非常に重要な意味を有する。

平均歪が 0.1 の時に標点距離内局所で仮想的に -0.005 ， 0.01 の歪変動発生を考える。標点距離内中央部で平均歪 $+0.01$ となる歪変動 B に対し標点距離内の歪変動和 0 を仮定し，標点距離内両端部で -0.005 の歪変動 A を考える。この時の (8) 式つまり荷重均一性の条件から計算される平均および局所の歪-歪速度の関係は Fig. 7 に示すように右下がりの曲線上にある。図には変形の進行に伴うこれら仮想点の歪-歪速度関係の時間変化も示す。平均歪より歪量が小さい局所 A の歪速度は平均歪速度より大きく，また逆に平均歪より歪量が大きい局所 B の歪速度は平均歪速度より小さくなる。その結果いずれの歪も時間経過とともに平均歪に近づき，一定時間後には平均歪に等しくなる。つまり局所の歪-歪速度の関係が右下がりの曲線上にある場合は，標点距離内に生じた局所の歪変動は収束し平均歪量に等しくなる。従来均一伸び以下の歪量で標点距離内ではいずれの場所も均一に伸びる理由として，高歪部は加工硬化のため硬くなり，その後の変形は軟らかい低歪部で主に進行し，結果として歪が均一化すると考えられてきた。Fig. 7 には各部の応力-歪の関係も示した。荷重均一条件の (8) 式で計算される同一時点の応力は高歪部ほど高くなっているがその平均応力との差は従来考えられた平均の応力-歪

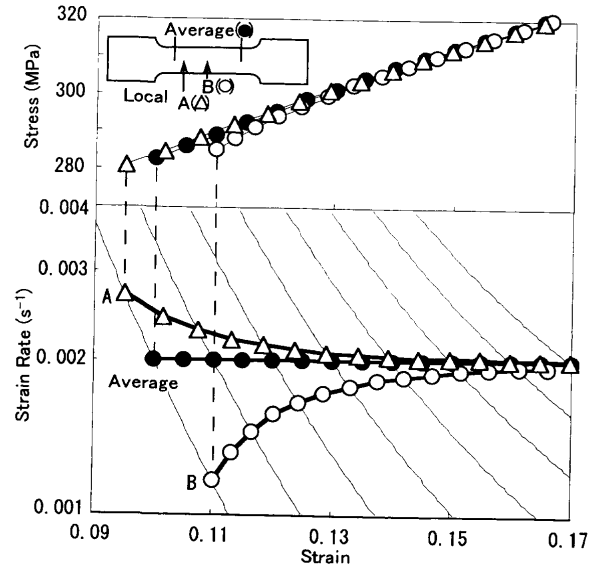


Fig. 7. Converging process of imposed strain fluctuation at points A and B (average strain; 0.1).

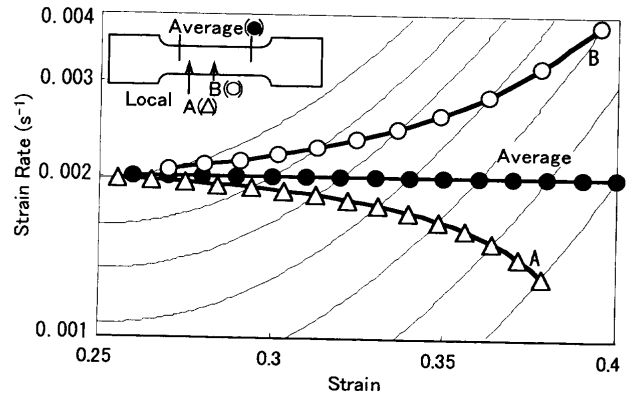


Fig. 8. Diverging process of imposed strain fluctuation at points A and B (average strain; 0.26).

関係（図中 ● 印）上で得られる応力差より小さい。従って変形が均一化する理由として歪量の変動に起因する応力差に加え木原³⁾の考える歪速度差の寄与も考えるべきである。

Fig. 8 では均一伸びを越えた平均歪量 0.26 の時点で標点距離内に仮想的に -0.005 ， 0.01 の歪変動発生を考える。なお実際の引張変形においては均一伸び以降はくびれが発生し応力状態が 1 軸から 3 軸状態になると考えられているが，Fig. 2 でみたように均一伸び直後の拡散くびれ初期では近似的に応力の 1 軸状態が続いているものとして以下考える。均一伸びを越える高歪領域での平均および局所の歪-歪速度関係は右上がりの曲線上にある。従って平均歪より歪量が小さい局所 A の歪速度は平均歪速度より小さく，また逆に平均歪より歪量が大きい局所 B の歪速度は平均歪速度より大きくなる。その結果標点距離内に生じた歪変動は先の例とは異なり，発散する。この発散の結果歪量が大きい部分はさらに歪量が増加しついには破断歪に達し破断する。その一方で逆に歪量が平均より小さい部分はさらに歪

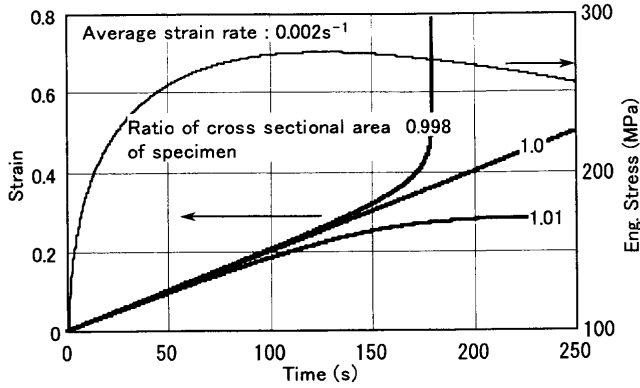


Fig. 9. Simulation for development of strain deviation due to initial fluctuation in cross sectional area of tensile specimen.
Ratio=area at local point/average area

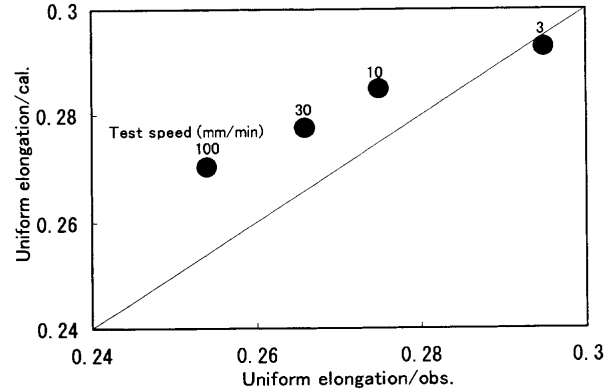


Fig. 10. Relation between uniform elongation calculated by constitutive equation and observed uniform elongation.

速度が小さくなり、ついには変形の進行が停止する。

実際の引張変形における歪変動としては標点距離内の組織、寸法の不均一や試験片つかみ部の影響などが起因になると考えられる。試片内の断面積不均一が変形中の歪変動にどのように影響するかをみるため構成式を用いた変形シミュレーションを行った。試片内の組織は均一、つまりどの部分とも同じ構成式に従うとの前提で試片断面積が小さい部分と大きい部分を考える。平均断面積に対する局所断面積の比を α とすれば(1)式の荷重同一性は(9)式に書き換えられる。

$$\bar{\sigma} \cdot e^{-\bar{\epsilon}} = \alpha \cdot \sigma' \cdot e^{-\epsilon'} \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$ は平均値、 σ' 、 ϵ' は断面積が平均の α 倍となる部分の値である。平均歪速度を 0.002 s^{-1} 、つまり $\epsilon = 0.002 \cdot t$ として平均の応力を(7)式で時間増分ごとに計算する。一方(9)式で局所($\alpha = 0.998, 1.01$)歪0、局所応力=降伏応力とにおいて得られる平均歪の時点で局所の変形を開始する。局所変形開始時の局所歪速度は(7)式で計算される。その後は局所の歪増分が 0.0005 となるように時間増分を調整しながら(7)、(9)式で平均、局所の応力、歪、歪速度を計算した。計算結果をFig. 9に示す。図中には(1)式で計算した公称応力の時間変化もあわせて示した。断面積の異なる局所では降伏時期が平均部と異なり、変形初期には歪量の差が発生するがこの差は急速に収束する。収束後もごくわずかな歪差が残り、均一伸び歪を越えたとこの差が拡大発散し、結果として実験で得られたFig. 3とほぼ同じ変形挙動となった。公称応力は歪差収束過程では増加し、最大値(TS)を経た後歪差発散過程では減少に転じる。

局所歪の収束、発散の分岐点では下に凸の曲線は歪速度一定の直線(平均歪-平均歪速度の関係)に接し、この接点が均一伸びを与える。この条件は(8)式において $\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \epsilon = 0$ とにおいて $\epsilon = \bar{\epsilon}$ を代入した(10)式を $\bar{\epsilon}$ について解いた解を公称歪に変換して与えられる。なお(10)式は(1)式で表現される公称応力の歪微分を0とおいた式と等価で

あり、従来の均一伸び条件式である $d\sigma/d\epsilon = \sigma$ に(4)式を代入し整理した式と同じになる。

$$c \cdot n \cdot \bar{\epsilon}^{n-1} - c \cdot \bar{\epsilon}^n = K \cdot \ln(\bar{\epsilon} / B) \quad \dots \dots \dots (10)$$

得られた均一伸び歪を(10)式に代入して、真応力を公称応力に変換すれば引張強さを計算することができる。前述の速度を変えて引張試験を行った実験材について、先に得られたパラメータを用い、本方法で均一伸びを計算した。計算均一伸びと実験均一伸びの関係をFig. 10に示す。計算値の方が 0.02 ほど大きい例もあるが、両者には相関が認められる。

以上述べたように熱活性化過程に基づいた簡略化構成式を用い、標点距離内の荷重の均一性を前提として先の実験結果の解釈を試みた。その結果標点距離内に生じた歪変動が均一伸びの範囲内では収束、均一伸びを越える範囲では発散すること、またその境界として均一伸びさらには引張強さが定義されることが明らかとなった。つまり応力-歪-歪速度の構成式の中の各パラメータが与えられれば任意の歪速度における引張強さを計算できる。ここで荷重均一条件に基づく平均、局所の歪-歪速度の関係から導かれる収束発散の挙動つまりFig. 6に示した下に凸のU字状曲線は他の構成式、例えば守谷ら⁸⁾、朴ら⁹⁾、谷村ら¹⁰⁾の提案する構成式を(1)式と組み合わせることにより同様に表現することができる。この収束発散挙動の物理的解釈については今後検討する必要がある。

4. まとめ

引張変形における変形挙動、特に変形前半の均一変形と後半の不均一変形の挙動を詳細に調べることを目的に、極低炭素薄鋼板を用い引張変形中標点距離内の歪分布を測定した。さらに熱活性化過程に基づいて導かれる簡略化した構成式歪-歪速度-応力関係式(簡略化構成式、式中パラメータはクロスヘッド停止試験および引張速度変更試験

により決定)を用いてこの変形挙動を詳細に解析した。

(1) 引張変形中標点距離各位置(局所)の歪は均一伸びまでは標点距離で測定される(平均)歪に等しいが均一伸びを越えると標点距離端部では変形が停止し、標点距離中央部に変形が集中する。つまり均一伸びまでは局所の歪速度は平均に同調するが、均一伸びを越えると一部では歪速度が 0 s^{-1} に収斂する一方標点距離中央部では歪速度が発散する。

(2) 引張試片標点距離内長手方向の荷重均一性を前提に、標点距離内平均と局所の応力-歪-歪速度の関係を構成式を用いて検討した。標点距離内の局所で許される歪-歪速度の関係は横軸歪量、縦軸歪速度の図上で平均値を通り下に凸となる曲線上に限定される。

(3) 平均歪量が均一伸び以下の領域では局所の歪-歪速度は右下がりの曲線上に位置し、均一伸びを越える領域では局所の歪-歪速度は右上がりの曲線上に位置する。その結果標点距離内に発生する歪変動は均一伸び以下の領域では収束し、一方均一伸びを越える領域では発散する。

(4) 初期微小断面積変動による局所変形挙動の時間変化を構成式を用い計算した。均一伸び歪までは局所歪は平

均歪に収束するが、その後平均より初期断面積が小さい部分では歪が急激に増大し、初期断面積が大きい部分では変形が停滞する。

(5) 均一伸びは下に凸の曲線が平均歪-歪速度関係の直線に接する点で定義される。

文 献

- 1) H.Moritoki and E.Okuyama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **38** (1997), 266.
- 2) J.P.Miles: *J. Mech. Phys. Solids*, **23** (1975), 197.
- 3) J.Kihara: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **17** (1978), 479.
- 4) M.Kato: *J. Jpn. Inst. Light Met.*, **46** (1996), 97.
- 5) S.Tanimura: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **29** (1990), 337.
- 6) 友田 陽, 朴 鐘皓, 土田紀之, 高木周作, 清水哲雄: 自動車用材料の高速変形に関する研究会成果報告書, 日本鉄鋼協会, 東京, (2001), 147.
- 7) S.Karashima, K.Maruyama and N.Ono: *J. Jpn. Inst. Met.*, **36** (1972), 218.
- 8) H.Moriya, K.Nagai, Y.Kawabe and A.Okada: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1016.
- 9) J.H.Park, Y.Tomota, S.Takagi, S.Ishikawa and T.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 657.
- 10) S.Tanimura and K.Mimura: *The 5th Int. Symp. on Plasticity and Its Current Applications (Plasticity '95)*, Gordon and Breach Publishers, Luxembourg, (1995), 28.