

(151) 冷延鋼板の降伏点現象とスキンプラス効果について

八幡製鉄, 技術研究所

清水 峯男・河原田 実

○柴田 政明・佐柳 志郎

On the Yield Point Phenomena of as Annealed and Temper Rolled Steel Sheet

Mineo SHIMIZU, Minoru KAWAHARADA

Masaaki SHIBATA and Shirō SANAGI

1. 緒 言

冷延鋼板の降伏点は冷延鋼板の加工性と密接な関係を有し, 降伏点を適切に制御することは冷延鋼板の製造上重要な問題である。

一般に軟鋼の降伏点は Petch の関係¹⁾により結晶粒度に依存することが知られており, その他温度および歪速度依存性について研究が行なわれている²⁾³⁾。

スキンプラス圧延は冷延鋼板の降伏点を低くし, ストレッチャー・ストレイン発生の原因となる降伏点伸びを消失させる効果的な方法として古くより実用に供せられている。しかしながら, その機構については不明な点が多く, 最近になつて BUTLER らがスキンプラス効果は降伏点の歪速度依存性により説明できるとの示唆を行なつた⁴⁾。

本実験は冷延鋼板の降伏点を適正に制御するための基礎資料とするため, 降伏点の結晶粒度および歪速度依存性について調べた。さらにスキンプラス効果が降伏点の歪速度依存性に基づくものであるという結果を得たので, これらについて報告する。

2. 供試材および実験方法

試料は転炉出鋼の低炭素リムド鋼で, これを種々の条件の熱間圧延, 冷間圧延, 再結晶焼鈍を行なうことにより, 板厚 0.8 mm, 結晶粒度番号 6.5~10 の焼鈍を行なつたままの冷延鋼板 (以後焼鈍板と略す) を得た。次に試料の一部に 1% のスキンプラス圧延を行ない, スキンプラス圧延を行なつた冷延鋼板 (以後スキンプラス板と略す) を得た。通常 1% 程度のスキンプラス圧延によりスキンプラス板の降伏点は最も低くなるといわれている⁴⁾。試料の代表的な化学組成は 0.047% C, 0.34% Mn, 0.015% P, 0.021 S, 0.0022% N である。

引張試験において, 試験片は JIS 5 号を使用し, 試験機は最小引張速度 0.005 mm/min のインストロン型引張試験機と 1.5 mm/min のアムスラー型引張試験機を使用した。焼鈍板の引張試験にさいしては, リューダース・バンドの異常発生による測定値の変動をさけるため試験片の曲率部 2 カ所に腰折を入れ, ここから作動するリューダース・バンドが 2 本拡がるようにした。

なお特殊な引張試験法として「ストップ法」を開発し引張速度がほぼ 0 mm/min に相当する焼鈍板の降伏点を測定するのに使用した。すなわち, 降伏点伸びの途中で引張試験機の駆動を止めて一種のリラキゼーションを行なわせ, 荷重の変化がなくなる点をもつて, 「ストップ法」による降伏点の測定値とした。また通常冷延鋼板の引張試験において降伏点近傍では 5 mm/min の引張速度が慣用されており, スキンプラス板の引張試験のさいには 5 mm/min の引張速度を使用した。5 mm/min の

引張速度は JIS 5 号試験片ではほぼ $1.4 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ の歪速度に相当する。

3. 実験結果

3.1 焼鈍板の降伏点の結晶粒度および歪速度依存性

Fig. 1 は焼鈍板の降伏点の結晶粒度依存性を示したもので, 引張速度を「ストップ法」(引張速度 0 mm/min に相当)と 5 mm/min の 2 通りに変えて測定した。引張速度にかかわらず Petch の関係¹⁾, すなわち

$$\sigma_y = \sigma_i + kd^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで, σ_y : 降伏点, σ_i : 平均摩擦応力, k : 常数, d : 平均粒直径

がよく成立していることが認められる。Fig. 1 より σ_i と k の値を求めると「ストップ法」の場合

$$\sigma_i = 3.8 \text{ kg/mm}^2, \quad k = 2.0 \text{ kg/mm}^2 \dots \dots \dots (2)$$

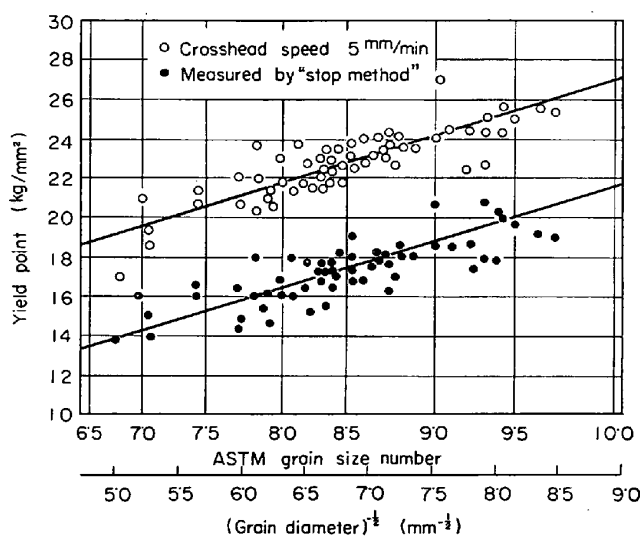


Fig. 1. Relation between yield point and grain diameter of annealed steel sheet.

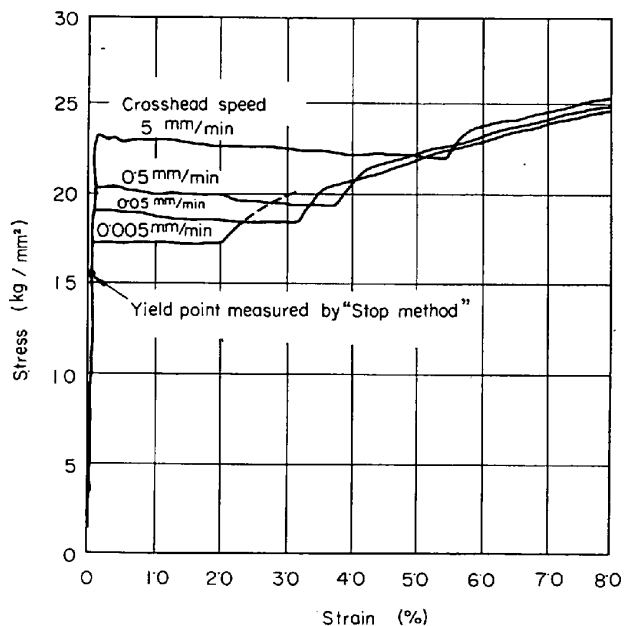


Fig. 2. Effect of strain rate upon yield point and yield point elongation of annealed steel sheet.

引張速度 5 mm/min の場合

$$\sigma_i = 9.2 \text{ kg/mm}^2, k = 2.0 \text{ kg/mm}^2 \dots\dots (3)$$

を得る。

Fig. 2 は焼鈍板の降伏点と降伏点伸びの歪速度依存性を引張速度を「ストップ法」および 0.005 mm/min から 5 mm/min まで変化して測定した結果である。焼鈍板の降伏点の歪速度依存性は非常に大きく、引張速度を「ストップ法」から 5 mm/min まで変えることにより降伏点は約 7 kg/mm² 増加している。

3.2 スキンパス効果

Fig. 3 は引張速度 5 mm/min で測定したスキンパス板の降伏点と「ストップ法」で測定した焼鈍板の降伏点の相関を示す。両者は良い相関を示し、スキンパス板の降伏点は「ストップ法」で測定した焼鈍板の降伏点と一致することを確認した。したがってスキンパス効果は本質的には降伏点の歪速度依存性に基づくものであり、焼鈍板にスキンパス圧延を行なうことにより、降伏点の歪速度依存性を非常に小さくする機構がスキンパス板に付与されるものと考えられる。

4. 考 察

軟鋼の降伏点と結晶粒度の間には(1)式で示される。Petch の関係が成立することはよく知られており、転位論の立場からも Petch の関係を導くことができる⁵⁾。焼鈍板中の転位は含まれている窒素や炭素が転位へ析出して転位を強固に固着しているため、降伏が起こるためには別に新しい転位が作られる必要がある。このような場合には次のような関係が成立つ。

$$\sigma_y = \sigma_f + 2\sqrt{\delta_c}(\sigma_c - \sigma_f) d^{-1/2} \dots\dots (4)$$

ここで、 σ_f : 転位の運動に対する摩擦力、 δ_c , 新しく転位が作られる位置と結晶粒界の間の距離、 σ_c , 転位を作るのに必要な応力である。

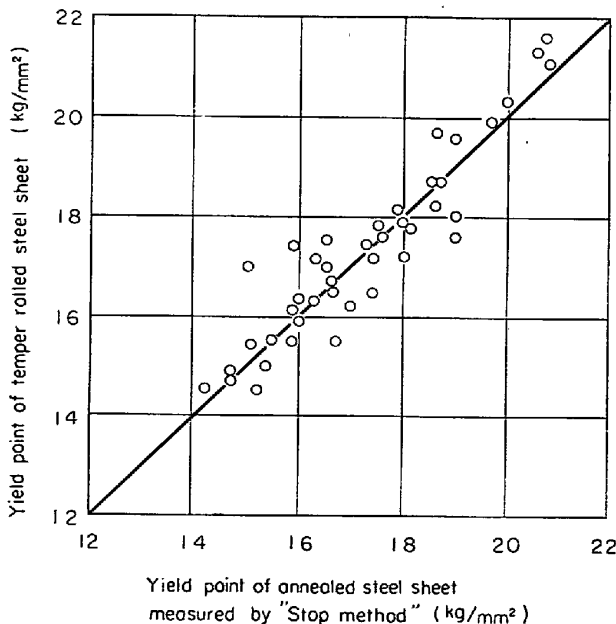


Fig. 3. Relation between yield point of annealed steel sheet measured by "Stop method" and yield point of temper rolled steel sheet.

さらに σ_f は温度 T および歪速度 $\dot{\epsilon}$ に依存する成分 $\sigma^*(T, \dot{\epsilon})$ と依存しない成分 σ_μ に分けられる²⁾。

$$\sigma_f = \sigma^*(T, \dot{\epsilon}) + \sigma_\mu \dots\dots (5)$$

現在問題にしているのは歪速度だけで温度は一定であるので(5)式は次式のように書くことができる。

$$\sigma_f = \sigma^*(\dot{\epsilon}) + \sigma_\mu \dots\dots (6)$$

今、JOHNSTON⁶⁾ と HAHN³⁾らの考え方を参考にして

$$\sigma^*(\dot{\epsilon}) = C\dot{\epsilon}^S \dots\dots (7)$$

ここで、C, S: 常数

という近似を行なえば、(4)式、(6)式、(7)式より次のような降伏点と結晶粒度、歪速度の関係式を得る。

$$\sigma_y = \sigma_\mu + C\dot{\epsilon}^S + 2\sqrt{\delta_c}(\sigma_c - \sigma_\mu - C\dot{\epsilon}^S) d^{-1/2} \dots\dots (8)$$

(1)式と(8)式の比較より

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \sigma_\mu + C\dot{\epsilon}^S \\ k &= 2\sqrt{\delta_c}(\sigma_c - \sigma_\mu - C\dot{\epsilon}^S) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

なる関係があることがわかる。

以下(8)式をもととして冷延鋼板の降伏点の結晶粒度および歪速度依存性とスキンパス効果について考察を行なう。まず、「ストップ法」により測定した焼鈍板の降伏点は(8)式において $\dot{\epsilon} = 0$ とおくことにより

$$\sigma_{y, \dot{\epsilon}=0} = \sigma_\mu + 2\sqrt{\delta_c}(\sigma_c - \sigma_\mu) d^{-1/2} \dots\dots (10)$$

で表わされる降伏点の歪速度に依存しない成分を測定していることになる。 σ_μ と $2\sqrt{\delta_c}(\sigma_c - \sigma_\mu)$ の値は(3)式より与えられ

$$\sigma_\mu = 3.8 \text{ kg/mm}^2, 2\sqrt{\delta_c}(\sigma_c - \sigma_\mu) = 2.0 \text{ kg/mm}^{3/2} \dots\dots (11)$$

である。さらに(2)式と(3)式よりわかるように k は歪速度により変化していないので、(9)式より本実験で使用した程度の歪速度の範囲では

$$2\sqrt{\delta_c}C\dot{\epsilon}^S d^{-1/2} = 0 \dots\dots (12)$$

とおいてさしつかえないことがわかる。したがって、焼鈍板の降伏点の歪速度に依存する成分 $\Delta\sigma_y(\dot{\epsilon})$ は結晶粒度とは無関係に

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_y(\dot{\epsilon}) &= \sigma^*(\dot{\epsilon}) \\ &= C\dot{\epsilon}^S \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

により与えられる。Fig. 2 より焼鈍板の降伏点の歪速度に依存する成分を求め、歪速度との関係を図示すると、Fig. 4 のようになり(7)式あるいは(13)式の近似がよく成立していることがわかる。図より S^{-1} の値を求めると

$$S^{-1} = 5.3 \dots\dots (14)$$

を得る。なお一般に降伏点の歪速度依存性を表わす近似式として

$$\sigma_y = B\dot{\epsilon}^r \dots\dots (15)$$

ここで、B, r: 常数

が使用されており³⁾、同じく焼鈍板の降伏点の歪速度依存性を Fig. 4 に記入し、これより r^{-1} を求めると

$$r^{-1} = 25 \dots\dots (16)$$

となる。 r^{-1} の値については種々の実験から 13~50 の値にあることが求められているが、降伏点の結晶粒度依存性などを全く無視しており、物理的な意味は少ないと考えられる。

以上のような結果から焼鈍板の降伏点現象は(8)式

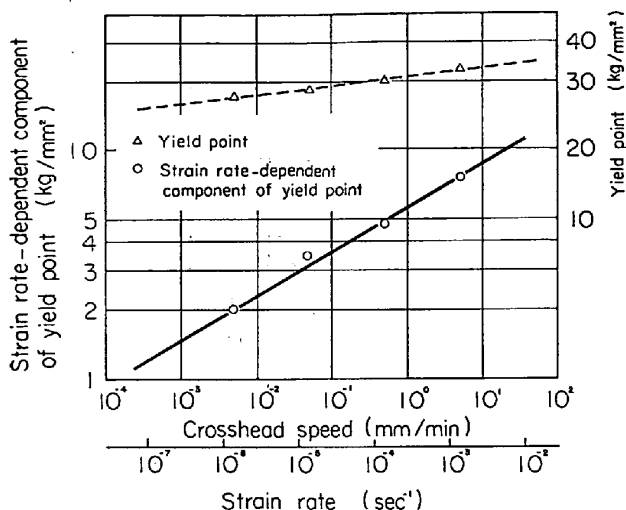


Fig. 4. Effect of strain rate on yield point and strain rate-dependent component of yield point of annealed steel sheet.

あるいは

$$\sigma_y = \sigma_\mu + C\dot{\epsilon} + kd^{-1/2} \dots\dots\dots (17)$$

により非常によく説明され、おのおのの常数は Fig. 1, Fig. 4 から求めることができる。

次にスキンプス効果は、スキンプス板の降伏点が「ストップ法」で測定した焼鈍板の降伏点と等しいことから本質的に降伏点の歪速度依存性に基づくもので、スキンプス板には降伏点の歪速度依存性を非常に小さくする機構が付与されていると 3.2 で考えた。このような機構についてはすでに BUTLER らが示唆している。すなわちスキンプス圧延は焼鈍板に不均一変形を生ぜしめるためスキンプス板には無数の変形部と未変形部が混在している。スキンプス板の引張試験を行なうさいには無数にある変形部がリュウダース・バンドの発生源となり、引張試験片中に数本のリュウダース・バンドしか発生しない焼鈍板に比べて、スキンプス板の降伏点の歪速度に対する感受性が非常に鈍くなり降伏点が低下する。スキンプス板の降伏点が「ストップ法」で測定した焼鈍板の降伏点と一致する事実は BUTLER らの示唆を正当化するものであり、スキンプス効果が降伏点の歪速度依存性に基づくものであることを立証している。

5. 結 言

冷延鋼板の降伏点の結晶粒度および歪速度依存性とスキンプス効果について調査し、次のような結果を得た。

(1) 焼鈍板の降伏点の結晶粒度および歪速度依存性は PETCH の関係に歪速度の影響を考慮した次式

$$\sigma_y = \sigma_\mu + C\dot{\epsilon}^S + kd^{-1/2}$$

により非常によく説明することができる。

(2) スキンプス板の降伏点は、「ストップ法」により測定した焼鈍板の降伏点と等しく、この事実はスキンプス効果が降伏点の歪速度依存性に基づくものであることを立証し BUTLER らの示唆を確かなものとした。

文 献

- 1) N. J. PETCH: J. Iron & Steel Inst.(U.K.), 174 (1953), p. 25
- 2) H. CONRAD: Proc. of the Conference on the

Relation between Structure and Strength in Metals and Alloys, (1963), p. 425, [Her Majesty's Stationary Office, London]

- 3) G. T. HAHN: Acta Met., 10 (1962), p. 727
- 4) R. D. BUTLER and D. V. WILSON: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 201 (1963), p. 16
- 5) 鈴木: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 2351
- 6) W. G. JOHNSTON: J. Appl. Phys., 33 (1962), p. 2716

(156) 薄鋼板の等 2 軸張出成形における成形限界について

八幡製鉄, 技術研究所

○中島 浩衛・菊間 敏夫

Forming Limits under Balanced Biaxial Stretching of Steel Sheets

Kōe NAKAJIMA and Toshio KIKUMA

1. 緒 言

薄鋼板の張出成形様式は応力条件によつて、等 2 軸引張応力、不等 2 軸引張応力あるいは通常の引張試験と同様の単軸引張応力に分類することができる。剛体ポンチによる張出成形は、摩擦条件の影響によつて不等 2 軸引張応力で行なわれるものが多い。これら各種の応力条件のもとでの張出成形性が、いかなる変形特性あるいは材料特性によつて支配されているかは、薄板の製造技術および薄板をプレス成形する立場から重要な問題である。

現在のところ、薄板の張出性には加工硬化特性が最も重要であるということが知られているけれども、定量的には必ずしも明確な実験結果が得られていない。また張出性を支配している不安定現象に関する塑性力学的理論研究^{1)~6)}も数多く行なわれているが、いずれの理論が最も妥当であるかについての実験的検証も断片的であり、系統的な研究はまだ行なわれていない。

薄板の張出成形性について考えるとき、その成形性には 2 つの場合がある。すなわち、第 1 の成形性は、不安定現象によつて生ずるネッキングの発生するまでの成形限界であり、第 2 の成形性はネッキングの生じたあと破断に至る破断限界である。通常行なわれているエリクセン試験、スイフトカップ試験、福井カップ試験などいずれも破断限界を示す成形性を表わしている。自動車車体のプレス成形性の難易度を問題とする場合は、ネッキングの生じたものは、もはや不良部品としてみなされるため、成形限界が問題となる。著者¹⁰⁾らは等 2 軸張出成形の破断限界について研究を進めているが、本研究ではネッキングの発生するまでの成形限界について円形のバルジ試験によつて検討を行なつた。

張出成形限界の研究を行なうにあたり、まず第 1 に、等 2 軸引張応力下でのネッキングを生ずるまでの成形限界の決定法について検討を行なつた。第 2 にその成形限界と材料特性との関連性を把握すること、第 2 に成形限界はいかなる不安定現象に関する理論が妥当かについての検討を加えた。