

円周方向せん断ひずみが表層部付加的せん断ひずみ層に与える影響

産業技術総合研究所 製造技術研究部門 デジタル成形プロセス研究グループ

主任研究員 梶野 智史

(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011024)

キーワード：付加的せん断ひずみ，円周方向ひずみ，伸線加工

1. はじめに

シリコンインゴットの切断（ワイヤーソー）などに用いられている細線材に対して，近年では，更なる高強度化，細径化が求められている．特に，ワイヤーソーで用いられるワイヤーは線径が細くなるほど，切りくずとなる部分を減らすことが可能になるため，歩留まりの観点から，細径化が強く望まれている．ワイヤーソーの主流である固定砥粒式ダイヤモンドソーワイヤーの現状では，砥粒の粒径を含んだ外径は， $\Phi 0.16\sim 0.18\text{mm}$ 程度であるが，砥粒粒径を含んだ線径が $\Phi 0.1\text{mm}$ 程度になることが要求されている．細径化を実現するには，伸線加工における伸線限界を向上させる必要がある．伸線限界の向上には，延性を維持したまま強度を向上させることが重要である．従来，太線材よりも細線材の方が，伸線限界が大きく，到達できる強度が高い，「サイズ効果」が知られている．この「サイズ効果」の原因の一つとして，伸線加工において，線材の表層部に発生する付加的せん断ひずみ層の効果が挙げられる．付加的せん断ひずみ層では，結晶粒が分断化されて細かくなっていることが確認されており，そのため，延性が維持されたまま，強度が向上している^{1)~3)}．この付加的せん断ひずみ層を効果的に利用することが伸線限界を向上させる有効な手段と考えられる．そこで，付加的せん断ひずみ層の強度をさらに高める方法を検討したので，その結果を報告する．

2. 付加的せん断ひずみ層について

伸線加工において，ダイスと線材の間の摩擦によ

って，線材の表層部が付加的にせん断変形を受け，付加的せん断ひずみ層が生じる．

ダイス形状を統一し，同じ減面率で伸線した場合において，線形と付加的せん断ひずみ層の深さとの関係を Fig. 1 に示す¹⁾．また，せん断変形を強調させる形状のダイスで伸線した，付加的せん断ひずみ層の組織写真を Fig. 2 に示す¹⁾．

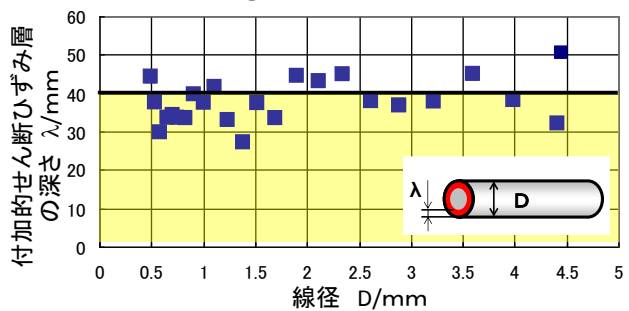


Fig. 1 各線径における付加的せん断ひずみ層の深さ

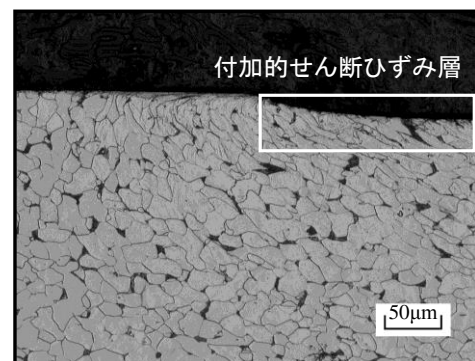


Fig. 2 せん断ひずみ層の内部組織写真

結果から明らかなように線径によらず，付加的せん断ひずみ層の深さはおよそ $40\mu\text{m}$ と一定である．そのため，線径が細くなるほど，線径に占める付加的せん断ひずみ層の割合が大きくなり，せん断ひずみ層の効果が顕著に現れるため，サイズ効果の主要

因の一つと考えられる。

伸線加工では、長手方向に伸ばされつつ、半径方向には減径される変形が加わっている。この変形により、結晶方位の回転が起こり、伸線加工の変形に対応した結晶方位に集合してくる。中心部では、この伸線加工に対応する変形しか発生しないため、一つの結晶方位へ集合している。それに対して、表層部では伸線加工の変形に加えて、付加的せん断変形が発生している。そのため、中心部では発生しない、付加的せん断変形に対応する結晶方位の回転が加わり、集合する結晶方位も2つになる。表層部では、この第2の結晶回転のため、結晶粒内の小角度の結晶方位差が発生し、それを起因として亜結晶粒界となるため、中心部と比較して結晶粒が分断化されて細かくなっている。細かい結晶粒となるため、強度が大きく向上するのに対して、延性の低下は小さく、延性が維持されたままの強化が可能となっている。

3. 付加的先ひずみ層の強化方法

表層部において、付加的せん断変形が発生することにより、第2の結晶回転が起こり、結晶粒が分断化されている。そこで、新たに長手方向とは異なる円周方向のせん断変形を加えて、更なる分断化を誘発させて付加的せん断ひずみ層の強化を図ることとした。異なる方向のせん断変形では、それぞれに対応したすべり系が活動する必要があるため、せん断方向とすべり方向が合うように、結晶回転が発生することが考えられる。多くの結晶回転が発生することにより、粒内への小傾角粒界の導入が進み、亜結晶粒界による分断化が促進されると考えている。

4. 実験装置の概要

4.1 周方向せん断ひずみの与え方

線材表層に周方向のせん断変形を加えるため、周方向に回転する機構を備えた伸線機を作製することにした。線材表層への周方向せん断変形の加え方として、3個のダイスを **Fig. 3** に示すように配置して、真ん中のダイスを回転させることによって、周方向せん断変形を発生させることを考えた。

しかし、この方式ではダイスの間で線材が捻じれるだけで、線材表層に周方向せん断変形を発生させることができなかった。それぞれのダイスを近接させても、ねじりの範囲が狭まるだけで、周方向せん断変形は発生しなかった。

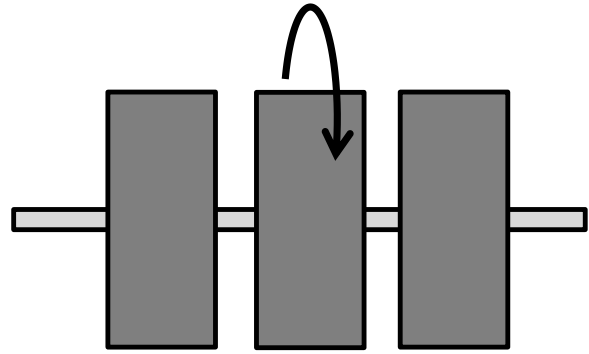


Fig. 3 3個のダイスによる周方向ひずみ付与方法の概要

そこで、**Fig. 4** に示すような3枚ダイスを考案した⁴⁾。1枚目のダイスは、アプローチ部として線材を減径させる。2枚目と3枚目はベアリング部に相当する。1枚目のダイスを入口ダイス、2枚目を中間ダイス、3枚目を出口ダイスと呼ぶことにする。入口ダイスと出口ダイスはダイスホルダーに固定しておき、中間ダイスのみ回転させる機構とした。入口ダイスと出口ダイスで線材を固定し、回転する中間ダイスで周方向のせん断変形を加える方式である。

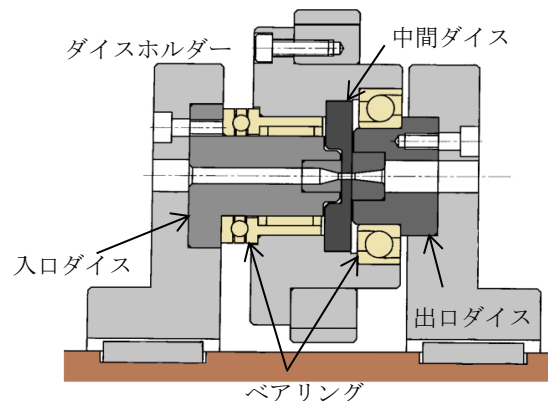


Fig. 4 3枚ダイスの概要

入口ダイスのアプローチ部の形状は、ダイス半角 7° の角度型形状とした。ダイス径は $\Phi 1.00\text{mm}$ とした。ベアリング長さは入口ダイスで 1mm 、中間ダイスで 3mm 、出口ダイスで 1mm とした。

中間ダイスはモーターの回転を伝達することによ

り、回転させることとした。モーターの回転を伝達する手段として、タイミングベルトおよびチェーンベルトによる伝達を試みてみたが、ベルトの張り具合により伝達力が変化し、不安定な伝達になっていたため、**Fig. 5** に示すように歯車を介して回転を伝達する方式を用いた。

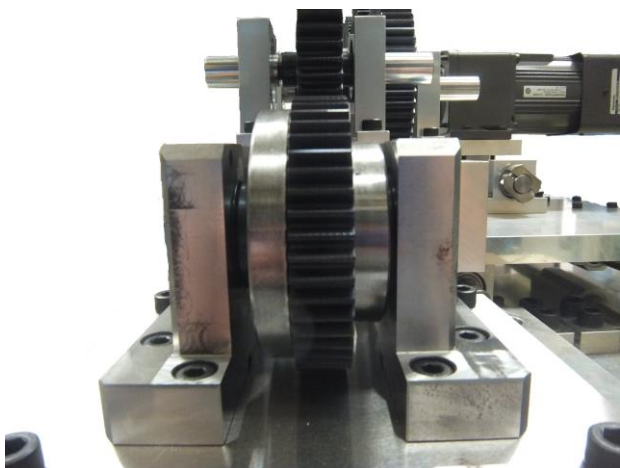


Fig. 5 中間ダイスの歯車

4. 2 回転ダイスの動力

90~1400rpm の範囲で可変速のリバーシブル式インダクションモーターを用いた。モーターの出力は、1200rpm 時で $0.59\text{N}\cdot\text{m}$ である。ギアヘッドは減速比 180 とした。伝達効率は 70% であるため、ギアヘッドを通した後の出力は $74.34\text{N}\cdot\text{m}$ である。回転ダイスまでの伝達中に、さらに伝達力を増幅させるため、**Fig. 6** に示すように同軸上に直径の異なる歯車を設置した。直径比は 1:3 であるため、伝達力も 3 倍になっている。ただし、回転速度は 1/3 になる。回転ダイスの速度は最大で 4rpm という低回転速度になるように、ギアヘッドと途中の歯車を設定した。

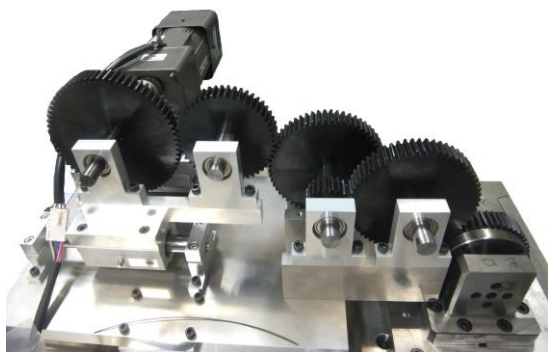


Fig. 6 歯車による回転力の伝達

4. 3 伸線加工の動力

伸線には **Fig. 7** に示すように容量 100kN の複動式油圧シリンダーを用いて、油の供給に自動ポンプを用いた。油圧シリンダーのストロークは 300mm である。伸線はドローベンチ方式として、**Fig. 8** に示すように、チャックを取り付けた台を、平行に設置した軸に設置したリニアブッシュに取り付け、水平方向に移動させ、線材を伸線した。チャックは **Fig. 9** に示すように挟み込む方式の細線引張試験用チャックを利用した。流入させる油量を調整することにより、0.1~1mm/s の範囲で伸線速度が可変である。



Fig. 7 伸線に用いた油圧シリンダー



Fig. 8 チャック用稼働台のリニアブッシュ

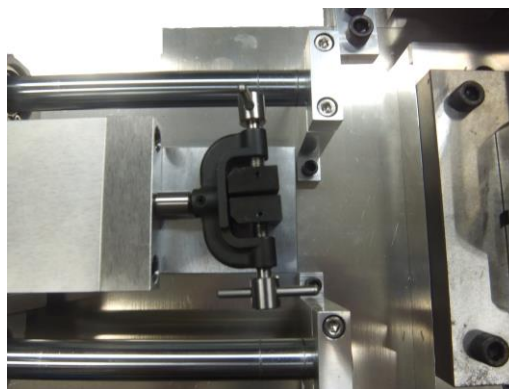


Fig. 9 伸線用チャック

4. 4 供試材

供試材は低炭素線 (S15C 相当) とし、化学組成は **Table 1** に示す。線径を 1.06mm とした。熱処理として、保持温度を 550℃ とし、保持時間を 4h とした焼鈍を施した。

Table 1 化学成分

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al
0.15	0.02	0.7	0.13	0.04	0.02	0.01	0.01	0.25

4. 5 伸線実験

今回の研究で用いたダイスは、前述のようにベアリング長さが長いので、減面率が数%程度でも断線してしまい、伸線加工ができなかった。そこで、周方向ひずみを与えることによる効果を把握するため、減面率をスキンプラスとし、伸線が可能となる条件で実験することにした。実際でも、本技術は伸線加工の仕上げ工程に適用することを目指していたため、スキンプラス伸線であっても有用性は損なわれなないと考えた。先付けを施した後、Φ 1.03mm、Φ 1.00mm のダイスで前伸線を加えた。その後、ダイス径 Φ 1.00mm の 3 枚ダイスで中間ダイスを回転させながらスキンプラス伸線を施した。潤滑剤はサンドロー D-383H を用いた。粘度は 40℃ で 76mm²/s である。伸線前に線材に潤滑剤を薄く塗布して伸線した。

伸線加工では、回転速度を最大として、伸線速度を変え、単位長さあたりに入る周方向のひずみ量を変化させることにした。最大回転速度は 4rpm である。伸線速度は最高速度の 1mm/s、および最低速度の 0.1mm/s とした。けがき線を入れ、回転スキンプラス伸線において、導入される円周方向の変位を測定した。また、スキンプラス伸線後に、15mm 程度の長さで 3 本ほど切り出し、樹脂固めて L 断面を研磨した。研磨後に硬さ試験を実施し、硬さ値を比較した。スキンプラス伸線しつつ、中間ダイスを回転させる場合のほかに、比較のため、中間ダイスを回転させない場合のスキンプラス伸線を行った線材も用意した。硬さ試験は、両方の表層部 (表面から 20μm 程度の深さ範囲)、中心部の硬さ値をそれぞれ 10 点ず

つ測定し、平均値を算出した。組織観察は、硬さ試験と同様に、樹脂固めて L 断面で鏡面まで研磨したのち、5%のナイタールでエッチングした。

5. 実験結果

けがき線の測定結果を **Table 2** に示す。回転スキンプラス伸線後のけがき線の傾き θ は高速度伸線の場合で、2.2°、低速度伸線の場合で 9.7° という結果になった。

Table 2 けがき線の傾き測定

伸線条件	けがき線の傾き θ /deg
高速度伸線	9.7
低速度伸線	2.2

硬さ試験の結果を **Fig. 10** に示す。また、**Table 3** に中心部と表層部の平均値の差を示す。回転なしで伸線した場合と比較して、回転がある場合では、中心部と表層部の硬さ値の差が大きいことがわかる。また、伸線速度が遅い方が、中心部と表層部の硬さの差が大きいこともわかった。このように表層部に周方向のひずみを与えることによって、表層部の硬度を上げることが可能であることが示された。

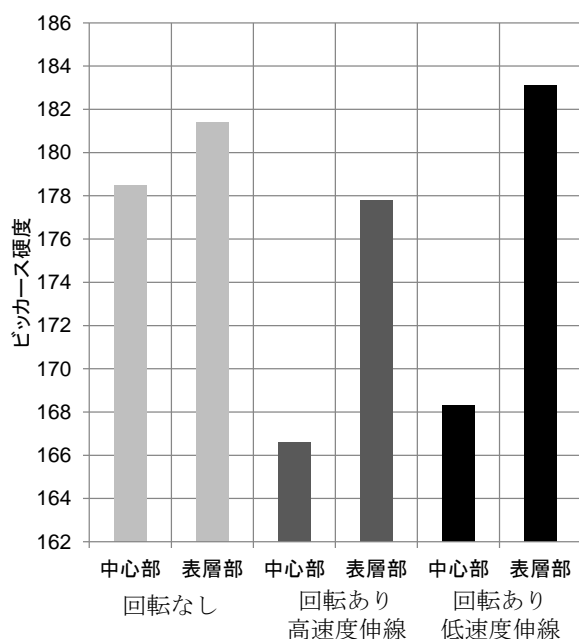


Fig. 10 硬さ試験の結果

Table 3 表層部と中心部の硬さの差

伸線条件	硬さの差
回転なし伸線	2.9
回転あり伸線	11.2
回転あり低速度伸線	14.8

つぎに、回転スキンプス伸線後の線材表層部の内部組織を観察した結果を Fig. 11 に示す。加えて、中心部の観察結果を Fig. 12 に示す。回転の有無で比較した場合、表層部と中心部ともに内部組織には大きな相違が見られなかった。しかし、Fig. 11 に示す表層部の結果において、矢印で示した個所は、結晶内部に導入された小傾角度差に起因する亜結晶粒界と見られる。その亜結晶粒界が、回転スキンプス伸線の方が多いと考えられる。これは、加えた円周方向のせん断変形により、結晶粒の回転が多く発生したため、小傾角粒界が増えたと考えられる。この小傾角粒界のため、結晶粒が分断化され、細かくなりビッカース硬さが上昇したと考えられる。

6. 結言

低炭素鋼の線材に周方向のせん断ひずみを付与するため、回転ダイスを含む3枚ダイスを考案し、伸線加工後の硬さについて検討した。その結果、周方向のひずみを付与することによって、表層部の硬さが向上し、付与する周方向のひずみが多いほど、表層部の硬さが向上することが確認できた。

謝 辞

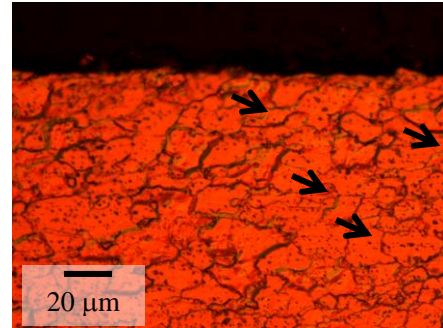
本研究の一部は財団法人天田財団の平成 23 年度研究助成によるものである。付記して謝意を表す。

参考文献

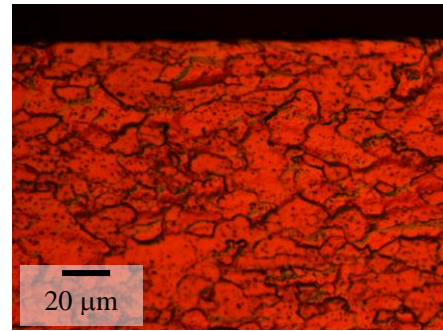
- 1) 梶野智史・浅川基男：塑性と加工, **47-549**(2006), 953 – 957.
- 2) 梶野智史・浅川基男：塑性と加工, **49-568**(2008), 409 – 413.
- 3) 梶野智史・浅川基男・細田一樹・前田康博：塑性

と加工, **49-568**(2008), 414 – 418.

- 4) 梶野智史・畠山知浩・田村容子・大澤優樹・清水了・村岡太郎・浅川基男：塑性と加工, **52-602**(2011), 370 – 374.

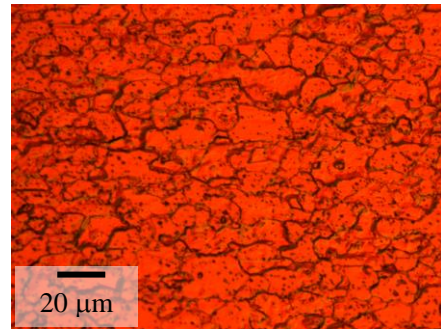


(a) 回転あり低速度伸線

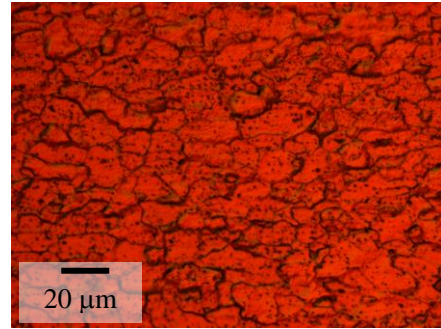


(b) 回転なし伸線

Fig. 11 表層部の内部組織観察



(a) 回転あり低速度伸線



(b) 回転なし伸線

Fig. 12 中心部の内部組織観察