

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420745

研究課題名(和文) 環境負荷低減、省エネを実現させる自動車用のワイヤハーネスと高たわみばねの開発

研究課題名(英文) Development of automotive wire harness and high deflection spring for reducing environmental burden and energy saving

研究代表者

吉田 一也 (Yoshida, Kazunari)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：80147123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：自動車用ワイヤハーネス電線は引抜きにより製造され、軽量でかつ線材の高強度のみではなく高延性、高疲労曲げ特性が要求される。一方向に引抜かれる通常引抜きでも高強度となるが、線材の伸び特性はよくない。交互引抜きと通常の一方向引抜きの2つの加工法で99.7%まで断面を縮小し、材料試験を行った。また、FEMによる応力・ひずみ解析およびEBSDによる決勝解析も行った。アルミニウム線材の交互引抜きした線材は良好な機械的性質を持ち、160MPaの引っ張り強さと破断ひずみは0.02を越える。アルミニウム引抜き線材は自動車用ワイヤハーネスとして十分利用できることを明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：Wires for automotive wiring harness are produced by wire drawing, and not only high tensile strength but also high ductility and high fatigue strength are required for them. Ductility of the drawn wire decreases as the frequency of wire drawing increases. In this study, alternately drawn wires and unidirectionally drawn wires of 99.77% total reduction were prepared, and the effect of alternate drawing on mechanical properties and texture of drawn wires were examined by tensile test, torsion test, fatigue test, FEM analysis and crystal texture analysis by EBSD. Tensile strength of alternately drawn wires represented more than 160MPa which is the strength required for wiring harnesses, and breaking strain of alternately drawn wires is 0.01 higher than that of unidirectionally drawn wires.

研究分野：材料加工

キーワード：塑性加工 引抜き ワイヤハーネス 軽量化 延性向上 交互引抜き

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車産業界では燃費向上や CO₂ 排出量削減による環境政策強化のため、車体の軽量化を目的にワイヤーハーネスの導体部を銅線からアルミニウム線に置換する研究が盛んに行われている^{1)~3)}。銅であれアルミニウムにしてもワイヤーハーネス材料としての必要な特性は高強度で且つ高延性・高疲労特性等である。それは簡単には断線せず、また組み付け時の曲げや捻り、振動等で破断しないためである。しかしながら、伸線において線材の強度と延性は相反する関係にあり両立させるのは困難である。

そこで本研究では、自動車用ワイヤーハーネスに用いるアルミニウム線に高強度に加え高延性や高疲労特性等を与える加工法として、「交互伸線加工」を提案した (Fig.1)。これは多パス工程のなかで1パス毎に伸線方向を入れ替えるもので、強度を大きく向上させ、靱性を低下させる要因である付加的せん断ひずみの形成を抑制する。

伸線により線材表層部に生ずる付加的せん断ひずみについては梶野ら⁴⁾が力学的、結晶学的に多くの調査を行っているほか、付加的せん断ひずみを利用した異周速圧延⁵⁾や ECAP 法⁶⁾等の所望の結晶方位を発達させる試みが行われている。交互伸線加工では、その付加的せん断ひずみの形成を抑制し、高強度だけでなく高延性や高疲労特性も線材に与える期待がある。また交互伸線加工による加工集合組織は従来とは異なることが考えられる。

2. 研究の目的

交互伸線加工がアルミニウム線に与える影響を調査するため、全て同一方向で引抜いた線材と伸線方向を交互に入れ替えながら引抜いた線材を用意し、種々延性試験から両者の機械的特性や疲労特性を比較した。その結果を基に、交互伸線加工により得られた伸線材のハーネスへの適用可否を検討した。また、交互伸線加工により付加的せん断ひずみを抑制することを明らかにするため、FEM (Finite element method) 解析により相当ひずみと要素形状の算出を行った。さらに、EBSD (Electron back-scatter diffraction) 法による集合組織解析とナノインデンテーション法によるヤング率測定を行い、交互伸線材が高延性な理由を考察した。

3. 研究の方法

本研究で使用した純アルミニウムの化学成分を Table 1 に示す。伸線には超硬合金製ダイス (半角 6°)、潤滑剤には石油系炭化水素潤滑剤を使用した。1パスの断面減少率 R/P を約 20% で 9.6mm の素線から 0.46mm まで 27 パス (総断面減少率 $R_t=99.77\%$) で細径化した。伸線における 1パスの断面減少率 R/P および総断面減少率 R_t の定義式を Fig.2 に示す。また、伸線は実験のし易さからドロ

ーベンチを使用した。

Table 1 Chemical composition of tested aluminum wire.

Al	Mn	Fe	Cr
99.65%	0.005%	0.25%	0.10%
Si	Ti+V	Cu	
0.10%	0.005%	0.005%	

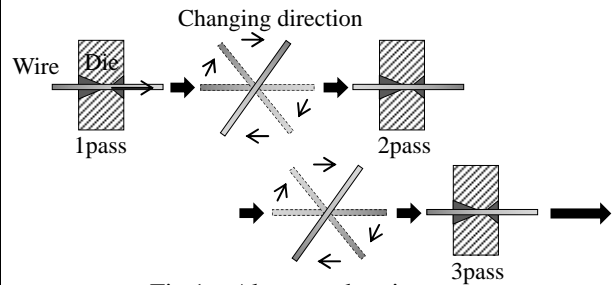


Fig.1 Alternate drawing.

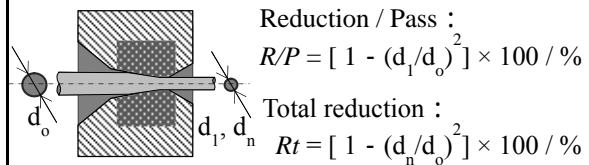


Fig.2 Definition of R/P and R_t of wire drawing.

4. 研究成果

4.1 交互伸線材の機械的特性

総断面減少率 $R_t=99.77\%$ (27 パス) まで細径化した交互伸線材と一方向伸線材の引張り試験を行った。得られた応力-ひずみ曲線と、伸線材の引張り破断面を Fig.3 に示す。

一方向伸線材に比べ、交互伸線材の引張り強さは約 20MPa 低いものの、破断ひずみは約 0.01 向上している。交互伸線加工は高延性の伸線材を得るのに有益な加工法であることがわかった。

ワイヤーハーネスに適用する機械的特性の目標値として、引張り強さを 160MPa 以上、破断ひずみを 0.02 以上とした。一方向伸線材では引張り強さの要求を満たしているものの、延性の条件を満たすことができない。交互伸線材はこれを双方ともに満たしている。交互伸線加工により製造したアルミニウム線はワイヤーハーネスへ適用するための機械的特性を十分に有していることがわかった^{7) 8)}。

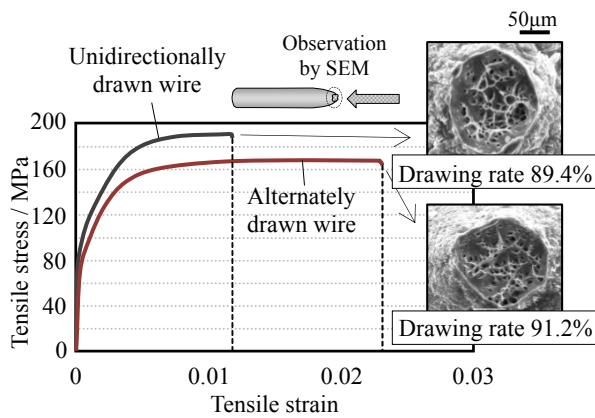


Fig.3 Stress-strain curves and SEM images of fracture surface in each drawn wire (after 27 pass, $R_t=99.77\%$).

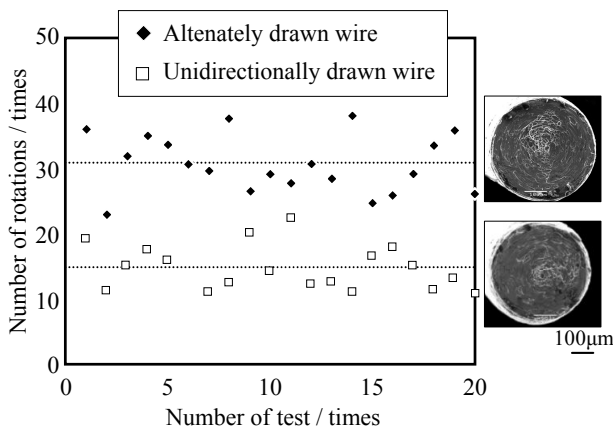


Fig.4 Results of torsion test in each drawn wire (after 27 pass, $R_t=99.77\%$).

次に、両伸線方法により総断面減少率 $R_t=99.77\%$ (27 パス) まで細径化し、それぞれの伸線材の捻回値測定を行った結果と、その際の捻り破断面を Fig.4 に示す。尚、線径 d に対する標点距離は $100d$ とし⁹⁾、捻回試験は結果のばらつきが大きいため、試験回数は 20 回とし、その平均値を比較した。

伸線材の捻り破断面は高延性時にみられる正常破断面¹⁰⁾が形成されており、交互伸線材の捻回値は一方方向伸線材に比べ 2 倍近く高い値を示している。交互伸線加工は伸線材の捻回特性も向上させることがわかった。

引張り試験、捻回試験において交互伸線材の延性が高かった要因としては、付加的せん断ひずみを抑制したほか、結晶粒分断化¹¹⁾も抑制したことが考えられる。

4.2 FEM 解析による伸線材の相当ひずみの算出とビッカース硬さとの相関

交互伸線加工により付加的せん断ひずみの形成を抑制していることを確認するため、FEM 解析により伸線材の要素変形と相当ひずみの算出をした。

伸線ダイスと線材の接触時における摩擦係数は 0.1 とした。伸線ダイスの半角は 6° とした。 R/P を 20%、線材のヤング率は 70GPa とした。

両伸線方法により $R_t=92.94\%$ (12 パス) まで FEM にて細径化した際の要素形状と、実験により観察した金属組織像を Fig.5 に示す。

一方方向伸線材の要素は伸線方向に引き伸ばされており、大きく先進している。このことから、

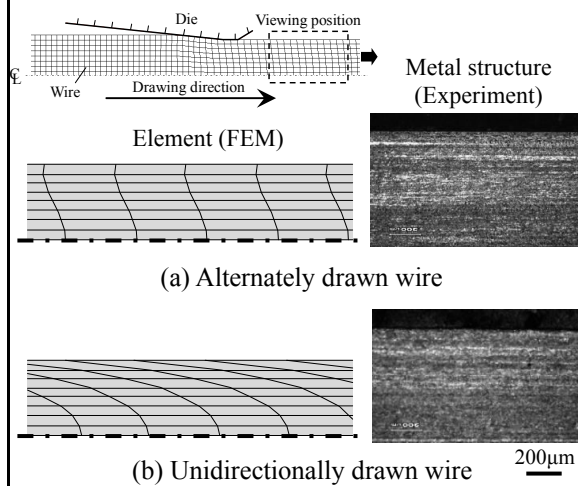


Fig.5 Comparison of element deformation (FEM) and metal structure (experiment) in each drawn wire (after 12 pass, $R_t=92.94\%$).

一方方向伸線加工では線材表層部に高い付加的せん断ひずみが形成されることがわかる。それに対し、交互伸線加工では、その先進を抑制し、付加的せん断ひずみを低減させていることがわかる。金属組織写真からは交互伸線材の方が繊維組織化を僅かに低減していることが確認でき、付加的せん断ひずみの形成を抑制していることが推測できる。

Fig.6 に、FEM 解析により算出した伸線材の相当ひずみ分布と、実験により測定した伸線材のビッカース硬さ分布を示す。

引抜きや圧延において、材料の相当ひずみの値とビッカース硬さの値には相関がある¹²⁾と既に報告されており、本実験結果でもそれらは良く一致していることがわかる。

一方方向伸線材表層部のビッカース硬さは、伸線材中心部に比べ 9.8% 高い値を示しているが、交互伸線材のその差は 2.9% である。これは Fig.5 から

もわかるように、交互伸線加工により伸線材表面層の付加的せん断ひずみを抑制させたことに起因している。

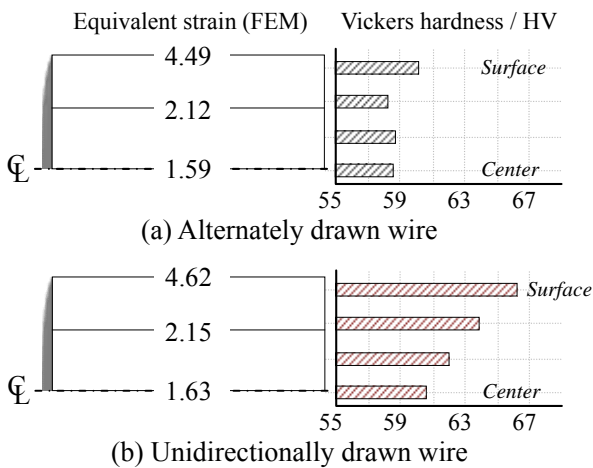


Fig.6 Equivalent strain distribution by FEM and Vickers hardness distribution in each drawn wire (after 12 pass, $R_t=92.94\%$).

4.3 交互伸線材の疲労特性

両伸線材の疲労特性を両振り曲げの繰り返し曲げ試験により調査した。

試験法として、伸線材を 45° ずつ曲げる簡易疲労試験機を作製し、破断までの繰り返し曲げ数をカウントした。また、純アルミニウム細線の疲労試験では試験片の寸法が小さいほど結果

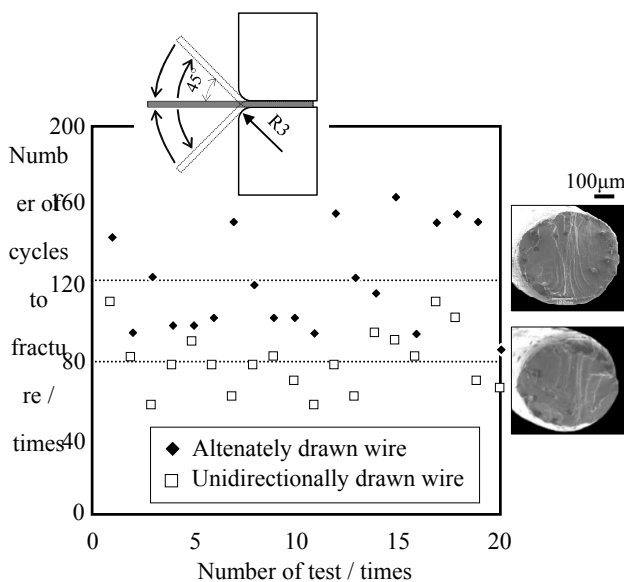


Fig.7 Results of cyclic bending test in each drawn wire (after 27 pass, $R_t=99.77\%$).

のばらつきが大きい¹³⁾と報告されているため、試験回数はそれぞれ 20 回とし、平均値を算出した。

測定結果と伸線材の破断面を Fig.7 に示す。

破断面はどちらも両振り曲げ時の疲労破断面¹⁴⁾を有している。破断までの繰り返し数にばらつきはみられるものの、それぞれの平均値を比較すると、交互伸線材の方が約 49.3%高い。交互伸線加工は伸線材の疲労特性も向上させた。

これは前節より明らかである付加的せん断ひずみを抑制したことが原因であるが、集合組織も影響していることが考えられる。次章では EBSD 法を用いた集合組織解析を行った結果を示す。

4.4 交互伸線材の集合組織とヤング率との相関

交互伸線材は一方方向伸線材とは機械的特性や疲労特性が大きく異なることがわかった。本章では EBSD 法を用いて両者の集合組織を調べ、交互伸線加工が伸線材の延性を向上させた要因を考察する。

$R_t=99.77\%$ (27 パス) まで細径化した両伸線材の結晶方位マップと ND (Normal direction) における逆極点図を Fig.8 に示す。尚、測定領域は伸線材 C 断面の 4 分の 1 とした。

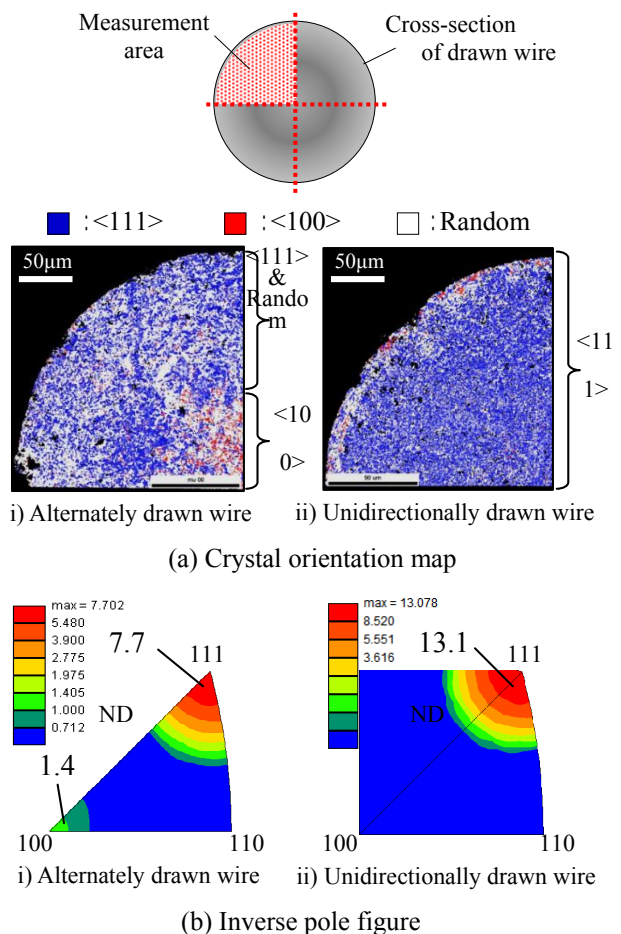


Fig.8 Crystal orientation map and inverse pole figure of several drawn wire (after 27 pass, $R_t=99.77\%$).

一方向伸線材は、内部の全面において<111>が支配的であることが確認できる。逆極点図をみると、<111>のみ配向強度が高まっており、<111>単一繊維組織が形成されていることがわかる。これは他者の知見¹⁵⁾と良く一致している。その一方で交互伸線材は、伸線材表面層に<111>がみられるものの、それと混合してランダム方位も形成されている。また伸線材中心部には<111>に加え<100>が配向している。逆極点図からは、<111>の最大強度は一方向伸線材よりも低い 7.7 を示しており、一方向伸線材にはみられなかった<100>は 1.4 を示している。交互伸線材には<111>に加え、ランダム方位と<100>も形成された。

<100>はアルミニウムを焼鈍した際の方角であり、また<100>は<111>に比べヤング率は約 10GPa 低いとされている¹⁶⁾。また組織微細化に伴う集合組織のランダム化は、高強度と高延性を両立させるのに有効であると報告されている¹⁷⁾。交互伸線加工では、<111>に加えて延性に富むランダム方位や<100>も配向させたことで、高強度で且つ高延性な伸線材が得られたことが考えられる。

アルミニウムの伸線による強加工材において<100>が占める割合は 0~8%程度とされている^{18)~19)}。しかしながら、交互伸線材の<100>が占める割合は約 10~20%であった。アルミニウムは積層欠陥エネルギーが低いいため、せん断変形の促進により頻繁に起こる交差すべりが起こり<111>へ容易に回転するが、交互伸線加工では交差すべりの頻発を抑制したことで、<111>だけでなくランダム方位と<100>を形成したことが考えられる。

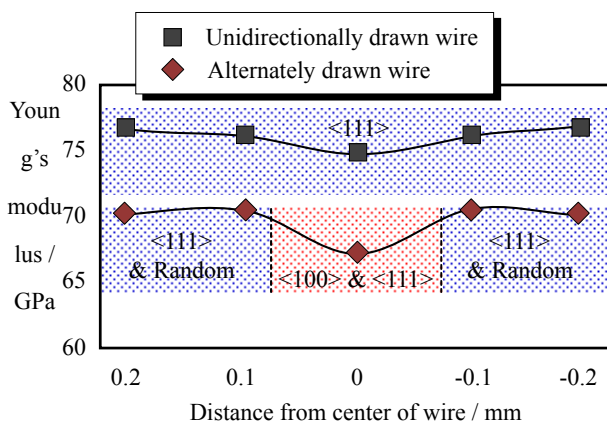


Fig.9 Comparison of Young's modulus of several drawn wire (after 27 pass, $R_t=99.77\%$).

さらに、交互伸線材の結晶方位が有する特性を調査するため、ナノインデンテーション法による

ヤング率測定を行った。結晶方位とヤング率には相関があり、それを調べるにはナノインデンテーション法が簡便で且つ有効であるとされている²⁰⁾。

ヤング率は、試験力を 50mN とし、伸線材 C 断面内の中心部から外周部に向かい 0.1mm 間隔で測定した。その結果を Fig.9 に示す。

交互伸線加工は伸線材外周部に<111>に加えランダム方位も配向させたことで、<111>単一繊維組織を有する一方向伸線材よりもヤング率は低い値を示した。また交互伸線材の中心部では、<111>よりも<100>が強く配向したため、一方向伸線材よりヤング率が約 8GPa 低い。

<111>のみが配向すると伸線材は高強度化するが、必要な延性や疲労特性を損なってしまい、ワイヤーハーネス材料としては適さない。強度だけでなく、延性や疲労特性を維持させるには、<111>に加えランダム方位や<100>を配向させることが有効であることがわかった。

4.5 異形断面を持つ線材を利用した軽量・高強度・高たわみばねの開発

自動車のエンジン用弁ばねとサスペンションばねなどを対象とする。現状のばね素線の断面形状を丸線から異形断面にすることにより、高強度・軽量、かつ高たわみのばね製作が可能になる^{21)~22)}。具体的には 1000~1500CC の自動車エンジンの弁ばねを伸線と曲げ加工による製造を検討した。現状では弁ばねの素線には 2.6mm 程度の丸線が使用されているが、本研究ではおむすび状の断面形状を持つ異形伸線材を検討した。FEM (有限要素法) によりダイスと伸線工程の最適化も検討した。また、得られた異形線材を曲げ加工によりばね成形した後に熱処理を行い、さらにショットピーニング加工を加えて高機能ばねを完成させた。

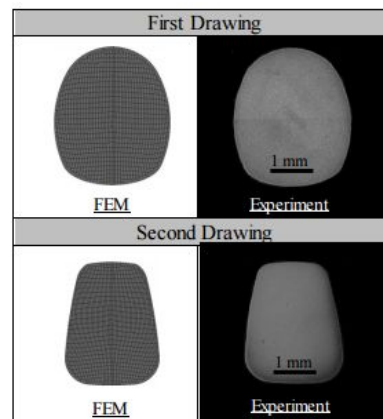


Fig.10 Cross sectional shapes of drawn shaped wire by FEM and experiment.

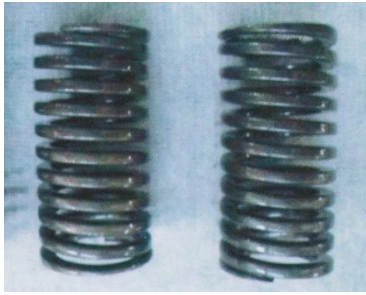


Fig.11 Developed valve spring

Fig.10 に得られた弁ばね用異形線材の断面写真を示し、Fig.11 には製作した弁ばねの写真を示す。ばね試験を行い、高いばね強度ならびに高たわみが得られることがわかった^{23),24)}。

4.6 成果のまとめ

交互伸線加工により 27 パス ($R_t=99.77\%$) でアルミニウム線を細径化し、交互伸線加工が伸線材に与える影響と自動車用ワイヤーハーネスへの適用可否、および異形引抜き線材を用いた高たわみ弁ばねの開発を検討した。得られた事柄を要約する。

- 1) 1 パス毎に伸線方向を入れ替えた交互伸線材は一方伸線材と比較し、引張り強さは約 20MPa 低いが、引張り試験における破断ひずみが約 0.01 大きくなる。交互伸線加工は、付加的せん断ひずみの形成を抑制し延性を向上させる。
- 2) 交互伸線材はワイヤーハーネスへ適用するための目標値である引張り強さ 160MPa 以上、引張り破断ひずみ 0.015 以上をクリアした。また、交互伸線加工は伸線材の捻回値、疲労特性も向上させた。
- 3) 交互伸線材が一方伸線材よりも高延性である理由は、繊維集合組織が異なるためである。一方伸線では<111>単一繊維組織が形成されるが、交互伸線は<111>に加え、線材表面ではランダム方位が、また中心では<100>が配向し、ヤング率が 5~10GPa 低くなる。
- 4) 異形引抜き材をらせん状に巻き製造した弁ばねは高たわみばねでかつ高強度の性能を持つことがわかった。これは自動車の軽量化に貢献する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) 吉田一也、Nitto Technical Report, 76(2016), 2-9.
- 2) K. Yoshida、H. Nagashima、Proc. of AMME2015,1(2016)、1-6.
- 3) K. Yoshida, K. Suga, Wire J. International, 47-8, (2014), 72-75.
- 4) 吉田一也、牧溪太、日本銅学会誌、53 巻 1 号、(2014)、72-78.
- 5) K. Yoshida, K. Doi, Procedia Engineering, 81(2014), 706-711.

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) 永島英敏、吉田一也、第 81 回伸線技術分科会、(2016)
- 2) 永島英敏、吉田一也、日本銅学会第 56 回講演大会(2016)
- 3) 吉田一也、塑性加工連合講演会、(2015)
- 4) K. Yoshida、K. Maski、The International Conference on Materials Processing Technology 2015、(2015)、1-6
- 5) 吉田一也、牧溪太、日本塑性加工学会春季講演会、(2014)
- 6) 吉田一也、土井晃太、菊池駿一、伸線技術分科会講演会論文集、(2014)、1-6.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
吉田一也 (Kazunari Yoshida)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：80147123

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし