

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560099

研究課題名（和文） ナノ結晶粒創製-切削摩擦加工法の提案と材料評価

研究課題名（英文） Suggestion of a cutting friction working process to form the Nano-crystal-grained structure and characteristic evaluation.

研究代表者

薬師寺 輝敏（YAKUSHIJI TERUTOSHI）

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：90210228

研究成果の概要（和文）：様々な製品の旋盤加工最終段階において、形状を整えるのと同時に、摩擦によって強歪加工を行うことで表面にナノ結晶粒を創生し、疲労強度を向上させるための研究を行った。特許出願の特殊形状チップを用いた切削摩擦加工を行うことによって、S45C 調質材、S45C 焼きなまし材および、Ti-6Al-4V 合金の表面に微細結晶粒を創生し、回転曲げ疲労強度を大幅に向上させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：In order to form Nano-crystal-grained structure on the surface and to raise the Fatigue strength, study which performs severe plastic deformation (SPD) at the final stage of lathe turning was carried out. By cutting friction working process which uses the chip of special shape, the ultrafine-grained structure was formed on the surface of the heat treated 0.45% carbon steel, the annealed 0.45% carbon steel and the Ti-6Al-4V alloy. The rotary bending fatigue strength of those materials improved greatly.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：ナノ結晶粒

1. 研究開始当初の背景

ECAP（Equal-Channel Angular Pressing）法や、ARB（Accumulative Roll Bonding）法、HPT（High Pressure Torsion）法などの形状不変加工¹）と呼ばれる強歪加工による微細結晶粒創生技術は大量生産に

莫大なコストがかかるため実用化はきわめて困難であり、当面は微小な部品等へ、一種の高機能材料として実用化を始めるほかは無い。一方、工業的にはショットピーニング、ドリル穴加工、切削加工、研削加工などの機械加工によって部品表層は超強加工を受け、

鉄鋼材料では厚さ数ミクロン程度の表層でナノ結晶組織が生成することが最近見出されている。申請者は機械加工を制御して部品表層にナノ結晶粒を生成させることを利用した新しい表面改質技術が実用化に最も近いと考えて研究を始めた。

2. 研究の目的

様々な製品の旋盤加工最終段階において切削摩擦加工を行い、形状を整えるのと同時に、耐摩耗性と疲労強度を格段に上げる技術を確認することが研究の目的である。この目的を達成するために以下の事項を明らかにする。

(1) 表面精度がよく欠陥の無い加工層を作るための切削摩擦技術の確立

(2) ナノ結晶粒生成メカニズムの解明と摩擦加工適応材料範囲の拡大

(3) 切削摩擦加工によって表面にナノ結晶粒層を創生した材料の疲労特性改善効果の検証

3. 研究の方法

目的(1)については摩擦加工バイトの形状や摩擦条件を検討し、表面精度がよく欠陥の無い加工層を作るための摩擦条件の確立を図る。摩擦加工は単なる摩擦ではなく、最終的には切粉を出しながら摩擦加工を行う切削摩擦加工によって、製品の寸法精度を維持しながら表面ナノ結晶粒を作り出すことが出来るようにする。

目的(2)については生地組織の違う様々な材料に摩擦加工を行うことで、ナノ結晶粒創製のメカニズム解明を図るとともに、摩擦加工による表面改質に適した材料用件を絞り込む。目的(3)については、切削摩擦加工を行った試験片について回転曲げ疲労試験を行う。

4. 研究成果

(1) ナノ結晶粒創成用摩擦加工チップ形状の検討

摩擦加工で欠陥ができるメカニズムには次の2通りがあることを解明した。1つは内部欠陥を生じさせるメカニズムで、図1に示すように摩擦チップの送り方向側で材料の盛り上がりが起こり、これをチップで押しつぶす時に表面直下に空洞ができる現象である。

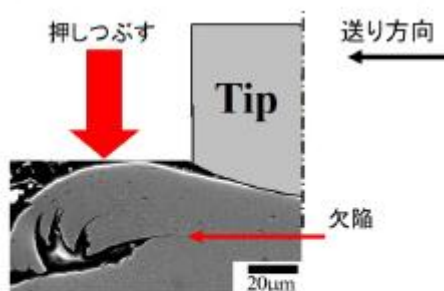


図1 内部欠陥生成機構

今一つは表面精度を下げるメカニズムである。摩擦加工で被加工物表面が凹凸に荒れ、盛り上がった部分が剥がれてチップの図2に示す部位に付着し、この付着物で加工物が摩擦されることで表面はさらに荒れた形状となる。またこの付着物が剥がれるとき工具との間を通過し被加工物に大きな凹みを生じさせることが明らかとなった。

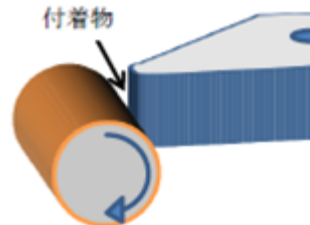
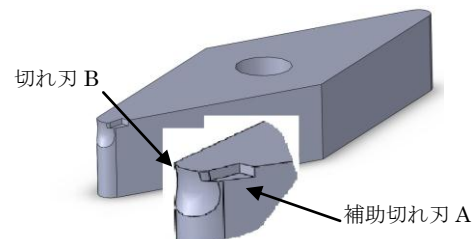


図2 金属片付着位置

前者を解決するためにチップの送り方向に切れ刃を配置し(図3のA)、必要以上に盛り上がった部分を削り落としながら摩擦加工を行えるようにした。このことで、表面直下内部に空洞ができることを抑えた。後者を解決するために、チップ先端の形状を鼓型とし、チップ上面(図3のB)が被加工材の余分な突出物を削り取るようにした。この形状を用い、チップと被削材の位置関係を調整することによって、付着物が付着するスペースをなくすことに成功した。



(2) 表面を切削摩擦加工した S45C 調質材の表面組織と回転曲げ疲労特性

S45C 調質材に摩擦加工を施すことによって表面にナノ結晶粒層を生成し、疲労強度を向上させることが報告されているが、表面に欠陥が生じ、図4の○マークのデータに示すように疲労強度にばらつきがあることが問題視されていた。この原因は摩擦加工面にできた欠陥であり、これを解消するために考案された前述のチップを用いて切削摩擦加工を行った試験片について回転曲げ疲労試験を行った結果を図4に●で示している。切削摩擦加工材の疲労限度は860MPaで、未加工材の疲労限度630MPaより約37%向上した。これまでの摩擦加工材の結果と比較して疲労寿命のばらつきが非常に少なくなっており、新しく考案したチップで内部欠陥が生じにくくなっていることが分かる。

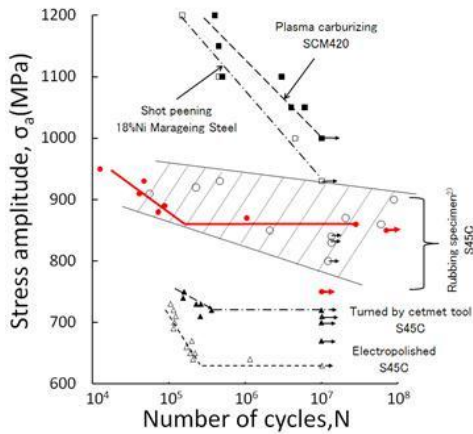


図4 S45C 調質鋼切削摩擦加工材の回転曲げ疲労強度

(3) 表面を切削摩擦加工した S45C 焼きなまし材の表面組織と回転曲げ疲労特性

第一段階として前節に記述したように、素材の硬さが比較的高い S45C 調質材材料で切削摩擦加工の効果を確認されたので、次のステップとして素材硬さの低い S45C 焼きなまし材に対して切削摩擦加工を行い、その効果を確かめた。その結果、最表面から 10 μ m 程度において 500nm 程度の微細結晶粒が部分的に生成され、直径 500nm 程度の微細なセメントイトも観察された。表面のビッカース硬さは素材の約 3.9 倍に向上し、また、

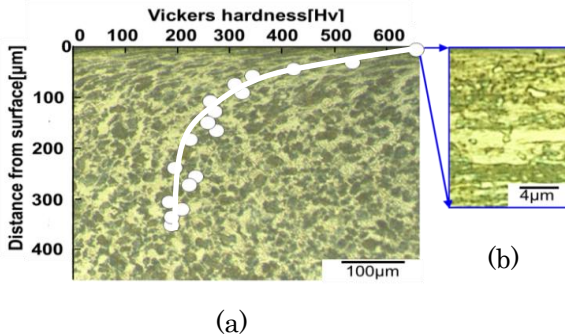


図5 S45C 焼きなまし材切削摩擦加工材のマイクロ組織と表面からの硬さ分布

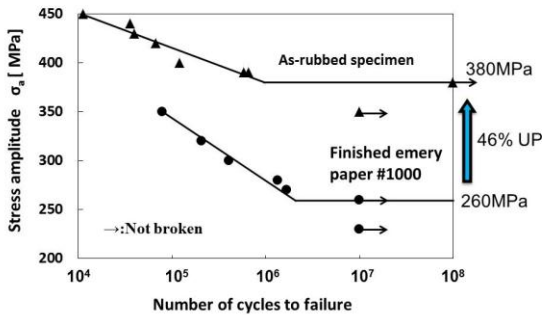


図6 S45C 焼きなまし鋼切削摩擦加工材の回転曲げ疲労強度

加工の影響範囲は表面からおよそ最表面からおよそ 250 μ m 程度であった (図 5 (a)および(b)). 疲労試験の結果 S45C 焼きなまし材未加工材の疲労限度は 260MPa であるのに対し、切削摩擦加工材の疲労限度は 380MPa と約 46%向上した。また、疲労寿命のばらつきは非常に少ない結果が得られた (図 6)。

(4) 摩擦加工を施した Ti-6Al-4V 合金の表面組織と回転曲げ疲労特性

宇宙・航空産業を中心に幅広い分野で使用されている Ti-6Al-4V 合金の疲労強度は表面性状に著しく影響されることが知られており、単純なガス窒化処理やショットピーニング等では疲労強度を向上させることはできないことが報告されている。このような背景から、本研究の最終段階として、Ti-6Al-4V 合金に切削摩擦加工を施し疲労強度向上が見られるのかを検証した。その結果、補助切れ刃を設けたチップによる摩擦加工によって、従来の摩擦加工で問題となっていた欠陥の発生を抑え、これにより表面から深さ約 20 μ m まで微細組織を形成し、最表層に 500nm 程度の β 粒を形成した (図 7)。また、表面のビッカース硬さは素材の約 1.4 倍に向上し、加工の影響範囲には表面から 20 μ m 程度であった (図 8)。

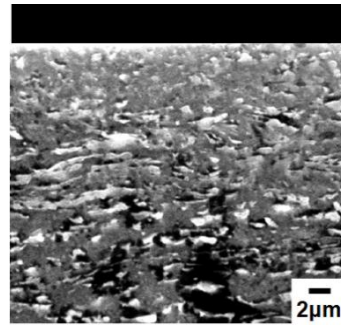


図7 Ti-6Al-4V 合金切削摩擦加工材の加工組織断面 SEM 写真

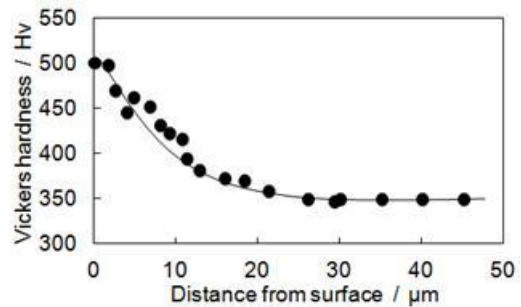


図8 Ti-6Al-4V 合金切削摩擦加工材の表面から深さ方向の硬さ分布

Ti-6Al-4V 合金切削摩擦加工材の回転曲げ疲労では有限寿命域での応力で大幅に疲労寿命が向上した。しかし、 10^7 回を超えた長寿命域では未加工材と同じ程度の疲労限度となった (図 9)。長寿命域の破壊は、ほとんどが加工層よりも深い位置にある α 粒の割れを起点とするフィッシュアイ破壊であることが背景にある (図 10)。すなわち、切削摩擦加工で表面層は強化できたものの、長寿命域では加工層とは無関係な部分を起点とする内部破壊であることから、未加工材と差がない結果となった。表面改質の困難な Ti-6Al-4V 合金において疲労強度改善が見られたことは意義のある結果である。

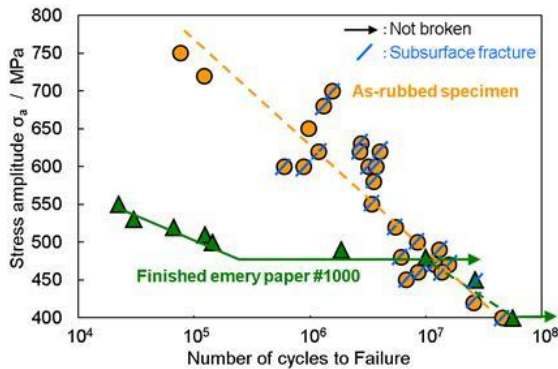


図 9 Ti-6Al-4V 合金切削摩擦加工材の回転曲げ疲労強度

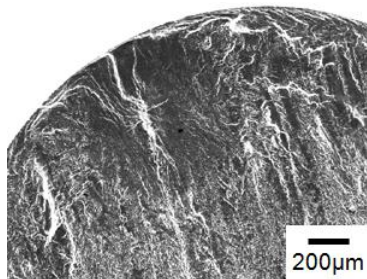


図 10 フィッシュアイ破壊破面 ($\sigma_a=700\text{MPa}$, $N_f=1.56 \times 10^6$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 薬師寺輝敏, 鈴木健太郎, 清水利弘, 戸高義一, 神志那薫, 中村裕紀, 中島正貴, 摩擦加工を受けた S45C の回転曲げ疲労特性の解明, 砥粒加工学会誌, 査読有, 56 巻 2 号, (2012) pp. 112-117
- ② M. Oka, Y. Tsuchida, T. Yakushiji, M. Enokizono, Fatigue Evaluation of Low Carbon Steel by Means of the Inductance Method Using a Pancake-Type Coil, Journal of the

Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 20, No. 2, 2012(6), pp.514-519

- ③ K. Kamil, M. Goto, S. Z. Han, K. Euh, T. Yakushiji and Y. Tatsukawa, Effect of Pre-stressing on the Growth Direction of Surface Cracks in Ultrafine Grained Copper, Proceedings of 4th international conference on crack path, (CP2012) 査読有, (2012-9) pp.123-134
- ④ M. Goto, K. Kamil, S. Z. Han, K. Euh, T. Yakushiji & N. Kawagoishi, Change in surface states of ultrafine grained copper due to cyclic stresses, WTT Transactions on Engineering Sciences, 査読有, Vol. 71, (2011), pp. 135-146.
- ⑤ N. Teshima, T. Yakushiji, M. Goto, Y. Ando, Kamil, S. Z. Han, N. Kawagoishi, Fatigue damage formation process of ultrafine grained oxygen-free and deoxidized low-phosphorous copper International Journal of Modern Physics B, 査読有, Vol. 24 (2010-5), pp. 2506-2511
- ⑥ 後藤真宏, 安藤吉則, 韓承博, 手島規博, 薬師寺輝敏, 金祥植, 超微細粒銅平滑材のき裂進展挙動と疲労破面, 機械学会論文集, 査読有, 76-765, A (2010-5), pp. 70-76

[学会発表] (計 15 件)

- ① 中川文紀, 薬師寺輝敏, 表面を摩擦加工した S45C 焼きなまし材の回転曲げ疲労特性, 日本機械学会九州支部第 66 期総会講演会, 2013 年 03 月 13 日, 九州産業大学
- ② K. Kamil, M. Goto, S. Z. Han, K. Euh, T. Yakushiji and Y. Tatsukawa, Effect of Pre-stressing on the Growth Direction of Surface Cracks in Ultrafine Grained Copper, 4th international conference on crack path, 19th September 2012, Villa Irland Hotel Gaeta, Italy
- ③ 薬師寺輝敏, 渡部杏伍, 後藤真宏, 戸高義一, 摩擦加工を施した Ti-6Al-4V 合金の表面組織と回転曲げ疲労特性, 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会, 2012 年 12 月 02 日, 大阪工業大学大宮キャンパス
- ④ 立川裕也, 後藤真宏, 手島規博, 山内康太郎, Kamil Kusno, 薬師寺輝敏, 強変形加工により形成された銅の微細組織と疲労強度, 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会, 2012 年 12 月 02 日, 大阪工業大学大宮キャンパス
- ⑤ 薬師寺輝敏, 旋盤を使用して表面改質を

- 行うための切削摩擦加工チップ，九州沖縄地区国立高専新技術マッチングフェア，2012年10月25日，福岡マリンメッセ
- ⑥ 中川文紀，薬師寺輝敏，摩擦加工したS45C焼鈍し材の疲労特性，日本機械学会九州学生会，第43回卒業研究発表講演会，2012年3月12日，佐世保工業高等専門学校
- ⑦ 渡部杏伍，薬師寺輝敏，表層に微細結晶粒を有するTi合金の回転曲げ疲労特性，日本機械学会九州学生会，第43回卒業研究発表講演会，2012年3月12日，佐世保工業高等専門学校
- ⑧ 佐藤一樹，薬師寺輝敏，大山英人，チタン合金予ひずみ材の回転曲げ疲労特性，第21回九州沖縄地区高専フォーラム，2012年12月3日，大分工業高等専門学校
- ⑨ 佐藤一樹，薬師寺輝敏，大山英人，逸見義男，チタン合金予ひずみ材の回転曲げ疲労特性，軽金属学会第121回秋季大会，2011年11月12日，早稲田大学西早稲田キャンパス
- ⑩ 渡部杏伍，薬師寺輝敏，戸高義一，表層に微細結晶粒を有するTi合金の回転曲げ疲労特性，軽金属学会第121回秋季大会，2011年11月12日，早稲田大学西早稲田キャンパス
- ⑪ 薬師寺輝敏，レプリカ法による表面観察で明らかにされた事，M&M2011材料力学カンファレンス講演会，2011年7月18日，九州工業大学
- ⑫ 横尾勇治，後藤真宏，薬師寺輝敏，立川裕出，KUSNO KAMTL，皮能石 紀雄，超微細粒銅のき裂進展挙動に及ぼす応力レベルの影響，日本機械学会九州支部宮崎講演会，2011年9月30日，宮崎大学木花キャンパス
- ⑬ 渡部杏伍，薬師寺輝敏，Ti合金の表面ナノ結晶粒創製と疲労特性，日本機械学会九州学生会第42回卒業研究発表講演会2011年3月11日，大分工業高等専門学校
- ⑭ 横尾勇治，後藤真宏，薬師寺輝敏，韓承博，微小孔を有する超微細流銅平滑材の微小き裂進展挙動，日本機械学会中国四国支部・九州支部合同企画2010年10月16日，徳島大学
- ⑮ 神志那 薫，戸高義一，梅本実，薬師寺輝敏，摩擦加工により形成した表層ナノ結晶粒組織をもつS45C調質材の回転曲げ疲労特性，日本鉄鋼協会秋季講演大会，2010年9月26日，北海道大学 札幌キャンパス，

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：切削摩擦加工用チップ

発明者：薬師寺輝敏

権利者：独立行政法人国立高等専門学校機構

種類：特許

番号：特願 2012-074218

出願年月日：24年3月28日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

薬師寺 輝敏 (YAKUSHIJI TERUTOSHI)

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：90210228

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

戸高 義一 (TODAKA YOSHIKAZU)

豊橋科学技術大学・機械工学系・准教授

研究者番号：50345956