

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03871

研究課題名(和文) TiNi合金の超弾性及び形状記憶特性が切削現象に及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Elucidation of the influence of super elasticity and shape memory properties of TiNi alloy on cutting phenomenon

研究代表者

静 弘生 (Shizuka, Hiroo)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：80552570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではニッケルチタン合金(TiNi合金)の切削加工実現に向けて、材料の超弾性が切削加工現象に及ぼす影響を検討した。その結果、NiTi合金の切削加工では超弾性の影響より仕上げ面に通常の金属加工では見られない大きな結晶粒段差が生じることがわかった。切削力測定とハイスピードカメラの観察では、NiTi合金の切削加工で加工開始時と終了時に応力誘起マルテンサイト変態による超弾性が被削材の弾性回復を引き起こし、切り残しの発生と工具摩耗の促進を招くことがわかった。また、被削材を相変態限界温度以上に予加熱して加工することによって、被削性や寸法精度、切削抵抗、工具寿命の改善が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TiNi合金は一般的に超弾性・形状記憶合金として知られており、その特性を利用して工業、医療、日用品など様々な分野で使用されている。これらの製品を作製するには切削加工が必要であるが、この材料は非常に被削性が悪い超難削材である。これはNiTi合金の上記に挙げた特異な性質が切削機構に複雑に影響するためであるが、この具体的な影響は未だ明らかになっていない。本研究ではNiTi合金の超弾性が切削機構に及ぼす影響を解明するとともに、被削材の予加熱により被削性や工具摩耗・加工精度の改善が出来ることを示した。この結果は、産業界における超弾性・形状記憶合金の利用拡大と消費者の利便性向上に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of superelasticity of NiTi alloy on the cutting phenomenon was investigated to realize the cutting of nickel-titanium alloy (TiNi alloy). As a result, it was found that the superelasticity caused large grain steps on the finished surface of NiTi alloy, which were not seen in normal metal machining. From the cutting force measurement and high-speed camera observation, it was found that the superelasticity caused by stress-induced martensitic transformation caused the elastic recovery of the workpiece at the beginning and end of the cutting process, which resulted in the generation of residual material and accelerated tool wear in the cutting process of NiTi alloy. It was also found that the machinability, dimensional accuracy, cutting force and tool life could be improved by preheating the workpiece above the phase transformation limit temperature.

研究分野：切削加工

キーワード：ニッケルチタン合金 NiTi合金 相変態 超弾性 マルテンサイト変態 結晶粒界段差 予加熱

1. 研究開始当初の背景

ニッケルチタン合金（以下 NiTi 合金と略）は代表的な形状記憶合金であり、その歴史は 1950 年代に形状記憶特性が発見されたことに遡る。その後 1980 年代に実用が進み現在ではアクチュエータや医療分野等で使用されている。NiTi 合金に関する研究のほとんどは材料分野における超弾性・形状記憶特性の現象解明と新たな合金の開発に関するものである。しかしながら、材料学の分野においても材料特性や結晶組織などに関し依然不明な点が多い合金である。また、NiTi 合金は製品の製造過程において切削加工等の 2 次加工が必要となるが、切削加工では穴を 1 穴開けることすら非常に困難な超難削材料である。NiTi 合金の切削加工に関する研究例は極めて少なく僅か数名の研究者による報告例を見るのみであり、いずれの研究例においても非常に被削性に劣ることや、加工の際は切削条件を低く設定することが望ましいと述べている程度である。また、NiTi 合金の組織構造にまで着目した研究は Y. Kaynak らの液体窒素を用いた研究例を見る程度である。このように NiTi 合金は超弾性と形状記憶特性という非常に特徴的な性質を有するが、これらが切削現象に及ぼす影響は明らかになっていなかった。このことから、研究代表者は平成 28 年度科学研究費助成事業若手研究(B)「課題：先進医療用超弾性・形状記憶合金の相変態制御による切削加工実現に向けた研究」において、NiTi 合金の医療用ステントの切削加工の実現を目標として NiTi 合金の被削性の調査と相変態制御による切削性改善を試みた。その結果、NiTi 合金の切削加工では切りくずの発色や形状、切削力波形などに通常の金属の切削加工では生じ得ないような特異な現象が生じることをこれまで報告していた。

2. 研究の目的

「目的 1：NiTi 合金の超弾性が切削加工に及ぼす影響の解明」

本研究では、NiTi 合金の切削時に相変態はどのように生じ、これが切削性にどのように影響を及ぼすのかを調べ、NiTi 合金の切削加工における切りくず生成および仕上げ面生成メカニズムの解明を目指した。NiTi 合金の切削加工に関する研究例は既述のように工具摩耗などの切削性に関するものに限られており、超弾性・形状記憶特性が切削特性に及ぼす影響について言及された報告例は見られない。

「目的 2：加熱切削による加工性改善効果の検討」

NiTi 合金の難削性は加工時に生じる合金の相変態に起因するものと考えられる。ここで、NiTi 合金はマルテンサイト変態限界温度 (Md) を有しており、この温度以上であれば相変態は生じ得ないことが分かっている。このことより、加工時に切削点付近を Md 温度以上に加熱しておくことにより相変態を抑制し、被削性の改善や工具寿命の改善を図ることが出来ると期待される。

3. 研究の方法

切削実験は主に汎用旋盤を用いて行った。実験項目に応じて外周旋削や汎用旋盤を用いた 2 次元切削を行った。超精密切削では分解能 10nm の超精密加工機 (東芝機械 ULG-100C) を使用した。切削抵抗は切削動力計 (Kistler9272) により測定した。切削状態の観察ではハイスピードカメラを用いた。予加熱を行う実験では、旋盤に取り付けた被削材にガスバーナーを用いて被削材をマルテンサイト変態限界温度以上 (175 度) まで加熱した後に切削を行った。

4. 研究成果

「NiTi 合金の切削加工における超弾性の影響」について、主に「切削条件と超弾性の影響」と「応力誘起マルテンサイト変態の影響」に着目し調査を行った。研究は、NiTi 合金の組織の検証、通常の切削加工における結晶依存性の検討、超精密加工における結晶異方性の影響の 3 項目について検討した。その結果、組織の観察結果より、NiTi 合金は 100~200 μ m の結晶粒の中に 5 μ m 程度の微小组織が構成されていることを明らかにした (図 1)。また、超硬工具を用いた通常の切削加工では、仕上げ面に工具の転写による凹凸(カッターマーク)よりも大きなうろこ状の段差が確認され、これが切削加工面の品質悪化を招いていることを明らかにした (図 2 左)。これは、NiTi 合金の結晶粒の大きさとほぼ一致するものであり、

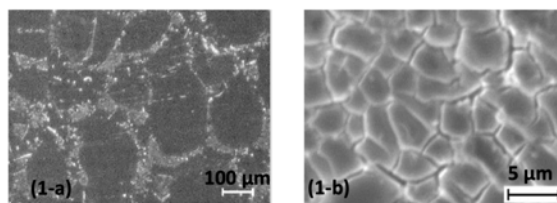


図 1 NiTi 合金の組織 (左) と微視組織 (右)

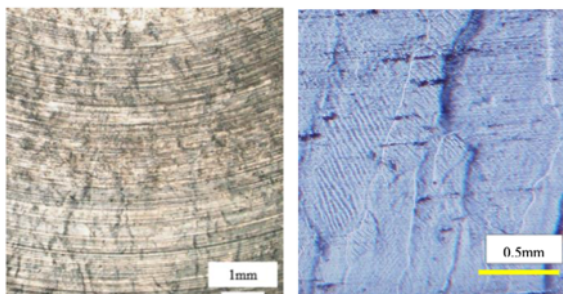


図 2 結晶粒界段差 (左) と表面突起 (右)

仕上げ面のうろこ状の凹凸は結晶粒界段差であることが判明した。さらに、仕上げ面には NiTi 合金の組織が加工中に相変態したことを示す表面突起が確認された (図 2 右)。これらの結果は、超精密加工機と単結晶ダイヤモンド工具を用いた超精密加工においても観察された。この原因を調べるために NiTi 合金のナノインデンテーション試験を行った結果、それぞれの結晶粒においてヤング率と弾性回復量が異なっていた。以上より、結晶粒界段差は材料の弾性回復の異方性と相変態ひずみの異方性の影響を強く受けていることを明らかにした。

「NiTi 合金の切削加工において相変態はどのように生じ、超弾性はどのように切りくず及び仕上げ面生成メカニズムに影響を及ぼすのか」を調べるために、円盤状の NiTi 合金を旋盤に取り付けて 2 次元切削を実施し、その際に切削動力計による切削力の測定と高速度カメラによる観察を同期させて測定を実施した。その結果、切削力の測定結果より NiTi 合金の切削では切削開始時と終了時に通常の金属加工では生じ得ない穏やかな切削力の増減が見られた (図 3)。この結果と高速度カメラの測定結果を比較した結果、この合金の切削加工では図 4 に示す以下の 4 つのモードを辿ることを明らかにした。

- I. 切削開始直後は 切削負荷による応力誘起マルテンサイト変態による被削材の大きな超弾性変形が生じ、被削材は工具が食い込むように大きく変形し、工具は上滑り現象が生じる。その際粉末状の極微な切りくずの発生を伴う。
- II. 応力誘起マルテンサイト変態の限界応力を超えて被削材はせん断変形を伴う切りくずの発生モードに移行し、極薄い切りくずが発生し切削力は切込みの増加に伴い増加する。
- III. 安定的な切削力、切りくずの発生に移行する。
- IV. 切削終了時は 4 切削力は穏やかに減少し、I の現象を伴って切りくずは発生し続ける。さらに、NiTi 合金の切削加工では切削時の負荷による応力誘起マルテンサイト変態と加工後の逆変態が生じ、加工後の仕上げ面に大きな形状回復が生じる。

さらに、切削速度を変更して切削実験を実施した結果、切削速度 10~50m/min の低速条件では仕上げ面の形状回復が生じるが、切削速度を増加させると 100m/min ではほとんど形状回復が見られず、高速切削において加工寸法精度の向上が見られる可能性を見出した。

切削前に予加熱を行うことによる NiTi 合金の切削性改善と最適加工条件に関する検討を行った結果、予加熱を行わない条件では加工中に被削材の温度が相変態限界温度(Md)を超えないため、被削材は不可逆的な超弾性形状回復を示し、部分的な相変態が生じることを明らかにした。この現象は 切削速度が 25m/min から 100m/min に増加するにつれて増加し、高速条件では寸法精度の低下や切削抵抗の増加、工具寿命の低下を招くことを明らかにし、高速条件はこの合金の加工に適していないことがわかった。一方、極端な低速条件(10m/min)では加工中に構成刃先が大量に堆積した。予加熱条件では、予め被削材の温度を Md 温度以上に加熱することにより、今回用いたオーステナイト系 NiTi 合金(室温)の被削性を大幅に向上し、仕上げ面性状の改善 (図 5) や切削抵抗の低減(図 6)、工具摩耗の低減 (図 7) ができることを明らかにした。ま

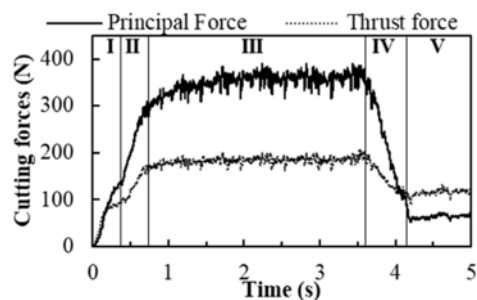


図 3 NiTi 合金の切削力波形

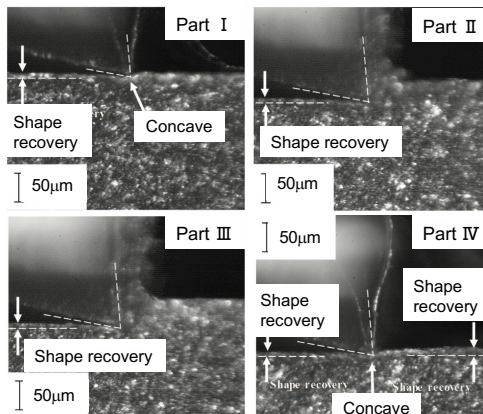


図 4 各モードにおける切削状態

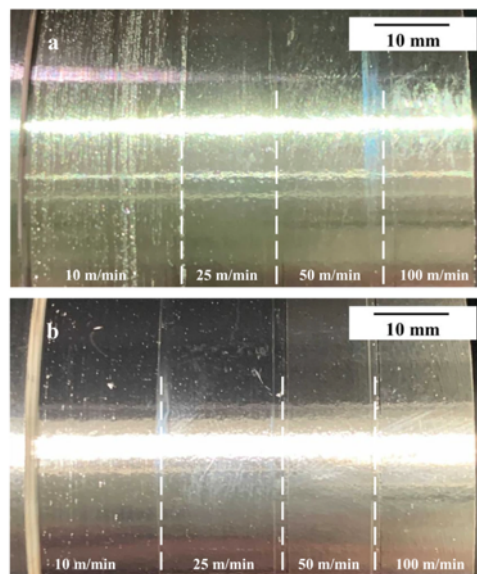


図 5 通常条件 (上) と予加熱条件 (下) における仕上げ面性状

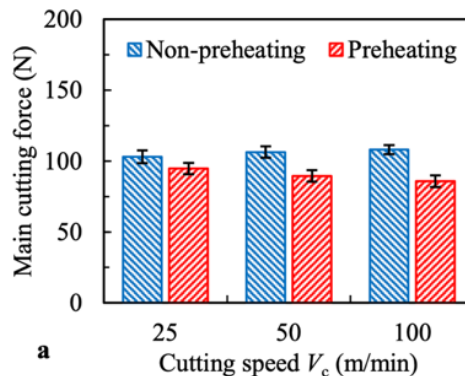


図 6 予加熱条件の有無と切削抵抗

た、予加熱を実施したときの最適条件は25m/minから50m/minであることがわかった。さらに、令和2年度は超弾性がNiTi合金の切削性と切りくず生成機構に及ぼす影響を調査するために、ハイスピードカメラを用いてNiTi合金の2次元切削における切削中の切りくず生成状態を記録し、得られた動画をデジタル画像相関法(DIC)による解析を実施した。その結果、NiTi合金の超弾性回復量を定量化することが出来た。

以上に示す研究結果より、NiTi合金の超弾性が切削機構に及ぼす影響を明らかにするとともに、被削材の予加熱を切削加工に導入することによりNiTi合金の被削性が改善できることを明らかにした。

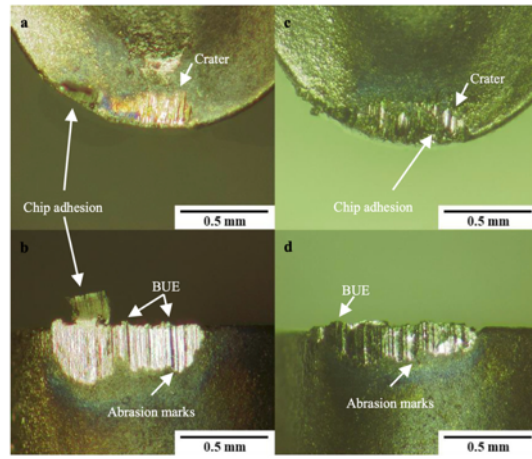


図7 予加熱の有無による工具摩耗の差異

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yang Hao, Sakai Katsuhiko, Shizuka Hiroo, Kurebayashi Yuji, Hayakawa Kunio, Nagare Tetsuo	4. 巻 15
2. 論文標題 Effect of Cutting Speed on Shape Recovery of Work Material in Cutting Process of Super-Elastic NiTi Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 24 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2021.p0024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shizuka Hiroo, Sakai Katsuhiko, Yang Hao, Sonoda Kazuki, Nagare Tetsuo, Kurebayashi Yuji, Hayakawa Kunio	4. 巻 4
2. 論文標題 Difficult Cutting Property of NiTi Alloy and Its Mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing and Materials Processing	6. 最初と最後の頁 124 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jmmp4040124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yang Hao, Sakai Katsuhiko, Shizuka Hiroo, Kurebayashi Yuji, Hayakawa Kunio, Nagare Tetsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental investigation of the effects of super-elasticity on the machinability of NiTi alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-021-07166-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hao Yang, Katsuhiko Sakai, Hiroo Shizuka, Kunio Hayakawa, Yuji Kurebayashi, Tetsuo Nagare
2. 発表標題 Mechanism of shape recovery phenomenon of work material in cutting of NiTi alloy
3. 学会等名 Proceedings of the 20th euspen International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樽林裕二, 酒井克彦, 静弘生, 楊昊
2. 発表標題 NiTi 超弾性合金の切削加工特性に関する研究 -超弾性が切削機構に及ぼす影響-
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊昊, 酒井克彦, 静弘生, 永禮哲生, 早川邦夫
2. 発表標題 NiTi 超弾性合金の切削加工特性に関する研究 -切削速度が被削材の相変態及び加工硬化に及ぼす影響-
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao Yang, Katsuhiko Sakai, Hiroo Shizuka, Kouta Fujii, Tetsuo Nagare
2. 発表標題 Formation mechanism of grain boundary steps in cutting of NiTi alloy
3. 学会等名 The European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen) 19th International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuo Nagare, Katsuhiko Sakai, Hiroo Shizuka, Hao Yang
2. 発表標題 Effect of the superelastic properties of a NiTi alloy on its machinability
3. 学会等名 Proceedings of the 18th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井功太, 楊昊, 酒井克彦, 静弘生, 永禮哲生
2. 発表標題 NiTi 超弾性合金の切削加工特性に関する研究 -切削加工面における結晶粒界段差の生成要因-
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楊昊, 酒井克彦, 静弘生, 藤井功太, 永禮哲生
2. 発表標題 NiTi 超弾性合金の切削加工特性に関する研究 -予加熱が切削加工特性に及ぼす影響-
3. 学会等名 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	酒井 克彦 (Sakai Katsuhiko) (80262856)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------