

内歯車創成ポリッシュ加工の実用化に向けた研究

藤村 宜孝：ニデックマシンツール株式会社，工学修士、技術士、米国 PE

Patrícia de Oliveira Löhner：アーヘン工科大学 工作機械研究室、工学修士

要旨

歯車にポリッシュ（研磨）加工を適用する目的は主に2つある。

(1)表面の微小亀裂の進展リスクを低減することによる耐久性の向上と、(2)伝達効率の向上、及びNVH(Noise Vibration and Harshness：騒音・振動などの不快さの指標)性能の向上である。耐久性の向上は、トラック、バス、農機分野においてポリッシュ加工を適用する主な目的となっている。一方、効率とNVHの更なる改善は、特に電気自動車分野において求められている。外歯車においては、研削、ホーニング、ポリッシュ加工が、熱処理後の仕上げ工法として確立されている。しかしながら、内歯車においては、研削、ホーニング、スカイピングといった熱処理後の仕上げ加工が適用されているのは限定的であり、ポリッシュ加工は未だ開発段階にある。

本稿では、内歯車の創成方式によるポリッシュ加工が、歯面品質に及ぼす影響について報告する。最初に、ポリッシュ砥石を用いた複数の加工条件設定について述べる。次に研削焼けが無く、面粗度 $Ra=0.05\mu\text{m}$ と $Rz=0.39\mu\text{m}$ の鏡面状の表面が得られた結果と、加工条件と表面性状との関係について解説する。最後に、目標とする表面性状を得ることができる、最も生産性の高い加工条件を提案する。

1. 背景

パワートレインの構造において、遊星歯車機構は、平行軸減速機構よりも高い減速比を小型、かつ軽量の構造にて実現し、トランスミッションの効率向上に寄与する[1]。また、遊星歯車機構を用いた装置において、騒音と振動の挙動に関する評価が進められている[2]。リングギアのわずかな幾何学的な歪みは、減速機構において加振力となり、騒音や振動発生の要因となる。このような歯車精度に起因する騒音や振動は、従来の内燃機関用トランスミッションに比べ、少ない歯車の数で構成される電気自動車用トランスミッションにおいて、より認知されやすくなっている[3]。このような背景から、リングギアの品質に対する要求は厳しくなっており、内歯車の高精度仕上げ加工のニーズが高まっている。

歯車の品質は、幾何学的形状と表面性状に大別される。幾何学的形状誤差は、騒音や振動につながる加振力の要因となる。微小亀裂の進展リスクを軽減する滑らかな表面性状は、騒音、振動、効率の改善と共に、歯車の耐久性を向上できることが期待される。耐久性の向上は、トラック、バス、農機用途にて重要視される。騒音、振動（NVH）と効率の改善は、回転数が高い電動自動車のパワートレイン、トランスミッション用途に重要な指標となっている。

外歯車の仕上げ加工には、高生産性と高品質を兼ね備えた創成方式の研削とポリッシュ（研磨）加工が量産にて実用化されている。これらの工法に関しては、様々な研究が実施されている[4, 5, 6]。研削加工は要求される幾何形状を得るために、ポリッシュ加工は $Ra0.1\mu\text{m}$, $Rz1.0\mu\text{m}$ よりも

小さな表面粗さを得るために用いられている。

内歯のリングギアでは、研削、ホーニング、またはスカイピングなどの仕上げ加工の適用は依然として限られている。内歯車創成研削は、ニデックマシニングツールが開発し、特許を保有する、量産に求められる歯車精度と生産性を両立する仕上げ加工法である。この高い生産性は、高速高精度主軸と、軸交差角に合わせた独自の砥石設計により実現している。2009年の市場投入以降、本工法は実生産に用いられ、効果が評価されてきた[7]。酸化アルミニウム砥粒を使った一般砥石と、cBN 砥石による内歯創成研削の生産性と経済性評価について、詳細な研究結果が報告されている[8,9]。これらの研究では表面粗さ Ra0.35 μm 以下であり、滑らかな表面性状の指標である Ra0.1 μm を得るに至っていない。本稿では、Ra0.1 μm 以下を得るために、内歯創成研削と同じ加工メカニズムを、弾性特性を有する樹脂砥石を用いて実現したポリッシュ加工の結果について報告する。

2. 内歯創成研削の紹介

内歯車創成研削は、外歯車創成研削と同様にねじ状砥石を用い、歯車の歯から歯へと連続的に噛み合いつつ、軸方向に砥石を動かすことにより研削を行う[10]。本工法では、歯車表面と砥石の相対速度は最大 30m/sec 程度になる。これを実現するためには、砥石の形状と高速高精度主軸の2つが鍵となる。

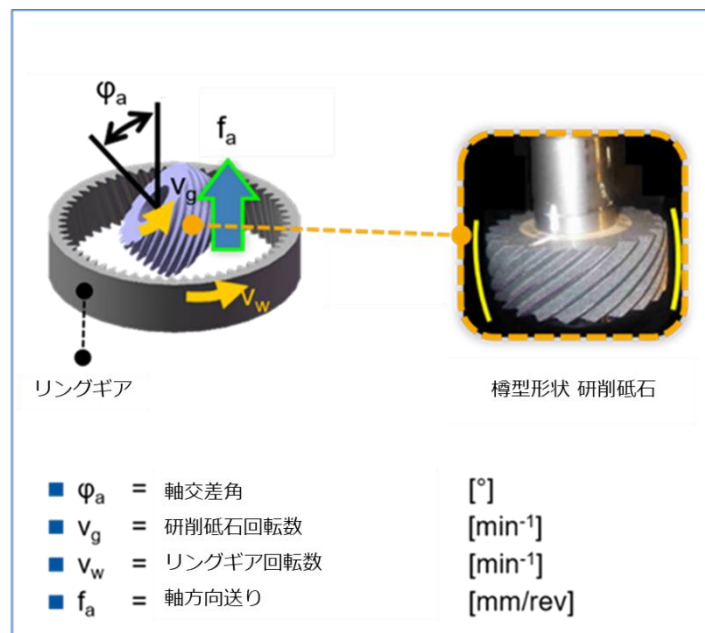


図1：内歯車創成研削の加工原理

歯車表面と砥石の相対的なすべり運動は、図1に示すように、軸交差角 ϕ_a によって得られる。円筒形状の砥石にこのような軸交差角を与えた場合、砥石と歯車に干渉が発生する。本工法では、図1の右側に示すように、砥石外形を樽型に設計することにより、歯車との干渉を回避しつつ、最適な砥石-歯車間の接触を実現している。

2つ目の重要な技術は、高速高精度主軸である。砥石を最大 15,000 min^{-1} にて回転させ、歯車と噛み合わせることで、高いすべり速度を得ることができる。その際、特殊な内部冷却システムによ

り主軸の熱による伸びを最小限に抑え、ソフトによる補正を行うことなく、量産において安定した精度を維持することができる。

藤村らによる以前の研究では、内歯車創成研削の生産性、品質について、切削速度や取り代などの加工条件の影響が調査された[7]。その中で、生産性と幾何形状、表面粗さ等の歯車品質も考慮した最適な加工条件が導出された[7]。図2に歯車品質に関する結果の一部を示す。

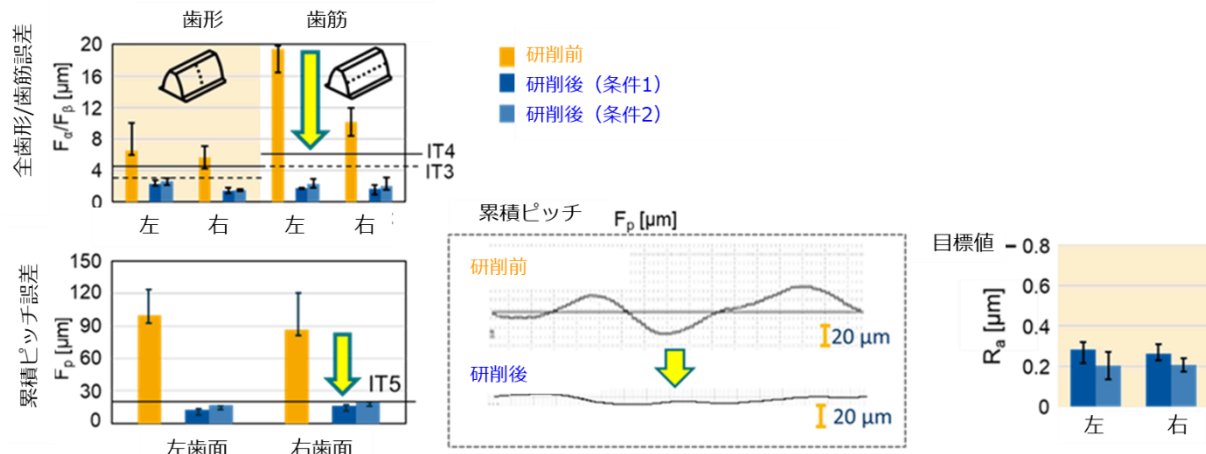


図2 内歯車創成研削における歯車加工精度

実施した全ての加工条件において、歯形と歯筋誤差は ISO 3 級[11] を満足した。更に、図 2 下段に示すように、振れ F_r と累積ピッチ誤差 F_p が改善され、熱処理による歪みが積極的に除去されたことを示す。また、図 2 下段右側に示すように、常に $Ra0.35 \mu m$ 以下の面粗さを得られた。

しかし、研削による表面粗さ $Ra0.35 \mu m$ では、第 1 章で述べた滑らかな表面によるメリットを得るには不十分である。表面粗さ $Ra0.1 \mu m$ 以下を達成するために、弾性樹脂砥石を用いた更なる工法の開発が望まれている。

3. 目的

前章で述べた技術ギャップを踏まえ、本研究の目的を、ポリッシュ加工条件と、歯車の幾何形状、表面性状の関係を明らかにすることと定義する。次章にて試験条件を、第 5 章にて加工条件と歯車品質の関係を説明する。第 6 章にて得られた結果を要約すると共に、要求精度を満足する最も生産性の高い加工条件を提案する。

4. 検証法案

本章では、ポリッシュ砥石の仕様、加工する歯車仕様、ポリッシュ加工条件、目標値、検査方法について述べる。

本試験に使用するポリッシュ砥石を選定するために、予備試験を実施した。この予備試験では、要求精度を満足するために、粒度の大きさや結合度の異なる砥石について比較を行った。その結果、粒度 800 の酸化アルミニウム砥粒を樹脂にて結合した砥石を本試験に使うこととした。砥石の寸法は、図 3 に示すように直径 $76mm \times$ 幅 $20mm$ であり、全ての試験に同一仕様の砥石を使用した。

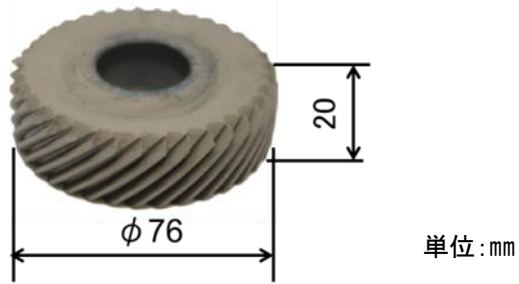


図3：研磨砥石の寸法

全ての加工試験において、表1の乗用車トランスミッション用途を模擬したリングギアを使用した。

表1：リングギア仕様

名称	値	単位
モジュール m_n	1.25	mm
歯数 z	85	
ねじれ角 β	20	deg.
圧力角 α	20	Deg.
歯先端径 d_a	111.17	mm
歯元径 d_f	116.92	mm
転位係数	0.3	-
歯幅 b	30	mm
硬度	HRC 60	
材質	SCR415 JIS	

ポリッシュ加工条件の影響を評価するため、図4に示す9つの評価条件を定義した。砥石回転数、ラジアル切り込み、およびアキシャル送り速度を変数として選択した。砥石回転数は、図1の軸交差角 ϕ_a を介して歯面-砥石間の相対すべり速度に換算できる。すべり速度は、加工性能を代表する指標であり、軸公差角30度において、砥石回転数 $1,500 \sim 11,945 \text{ min}^{-1}$ は、すべり速度は $3 \sim 24 \text{ m/s}$ に相当する。アキシャル送りは $0.02 \sim 0.04 \text{ mm/ワーク回転数}$ とした。これらの砥石回転数、アキシャル送りは、加工時間、生産性に直接影響する指標である。ラジアル切り込みは $0.02 \sim 0.25 \text{ mm}$ の範囲で設定した。

加工試験には、研削済みの歯車を使用し、ポリッシュ加工試験直前にポリッシュ砥石をドレスし、ポリッシュ加工を1パスで行った。

No.	砥石 回転数	すべり 速度	アキシャル 送り	ラジアル 切込み	加工時間
	min ⁻¹	m/s	mm/p-rev.	mm	sec.
1	1,500	3	0.02	0.02	230
2				0.05	230
3				0.10	
4				0.15	
5				0.25	
6	3,850	8	0.02	0.05	89
7	8,000	16	0.02	0.05	43
8	11,945	24	0.02	0.05	29
9	1,500	3	0.04	0.05	115

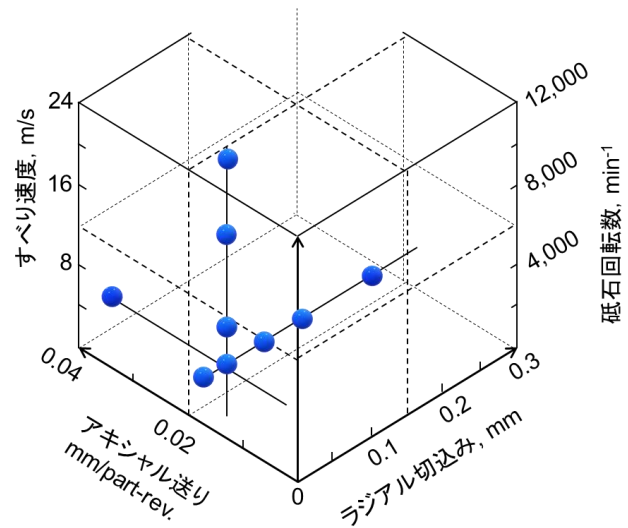


図 4：加工条件の設計

ポリッシュ加工した歯車は、形状、表面粗さ、研削焼けについて評価した。歯車形状は歯車測定機にて測定し、ISO 等級 5 を目標と設定した。表面粗さは触覚式測定機にて歯面中央の歯形方向を測定した。総測定長 l_n は 1.5mm、カットオフ波長 λ_c を $0.25 \mu\text{m}$ として、 $R_a 0.1 \mu\text{m}$ 、 $R_z 1.0 \mu\text{m}$ 以下を良品条件とした。研削焼けはナイタルエッチング法で評価した。

5. テスト結果

5.1 ラジアル切込みの影響

本章では、ラジアル切込みの影響について述べる。前章で述べたように、ラジアル切込みを図 4 に示すテストポイント No.1~No.5 の 5 段階に変化させた。表面粗さへの影響を図 5 に示す。左のグラフは R_a 、右のグラフは R_z で示している。ラジアル切込みが大きくなるにつれて表面粗さは減少しているが、ラジアル切込みが 0.15mm 以上ではそれ以上の減少は見られない。ラジアル切込みが 0.10mm 以上で、目標の $R_a 0.1 \mu\text{m}$ を達成した。 R_a と R_z の間にて同様の傾向が認められるため、以降、本稿では R_a の結果のみを示すこととする。

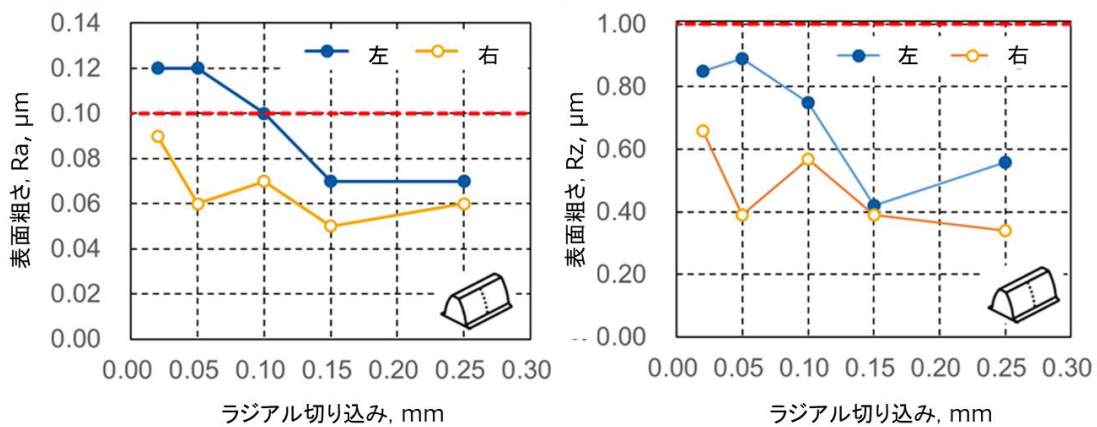


図 5：ラジアル切込みの影響

図 6 はポリッシュ加工後の $F\alpha$ 歯形総合誤差、 $F\beta$ 歯筋総合誤差を示す。ラジアル切込みが 0.15mm 未満の場合、 $F\alpha$ と $F\beta$ は ISO 5 級内で安定している。しかし、ラジアル切込みが 0.25mm では、ISO 5 級を超過した。図 7 はラジアル切込み 0.1mm のポリッシュ加工前後の歯形、歯筋精度を示す。ポリッシュ加工により歯形、歯筋に変化は認められない。また、ポリッシュ加工により B.B.D. (Between Ball Diameter) は 0.004mm 増加したが、これは通常の研削によるばらつきの範囲内である。これらの結果から、ラジアル切込み 0.15mm がポリッシュ加工によって歯車形状が変化しない限界であると言える。

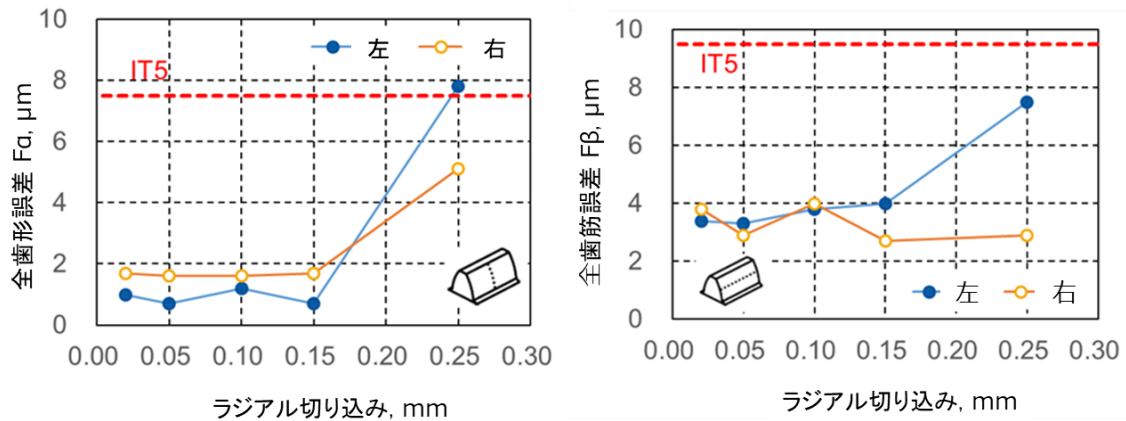


図 6 ポリッシュ加工後の歯形、歯筋誤差

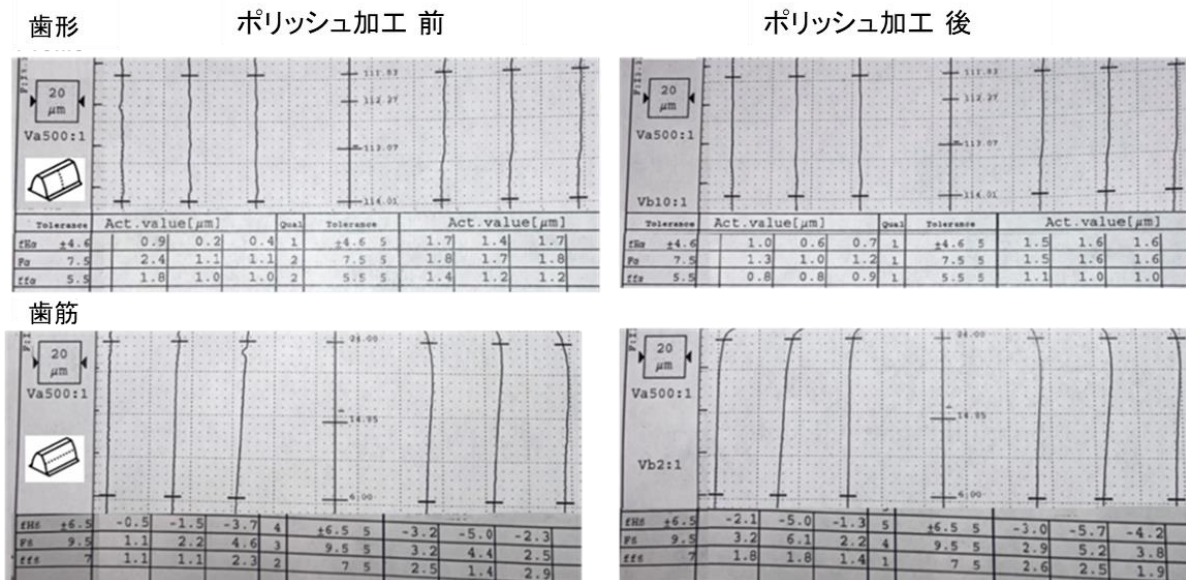


図 7: ラジアル切込み 0.1mm におけるポリッシュ加工前後の歯形、歯筋精度

図 8 はラジアル切込み 0.1mm における、ポリッシュ加工前後の表面性状を示す。ポリッシュ加工により粗さ曲線のピークが除去されていることが分かる。

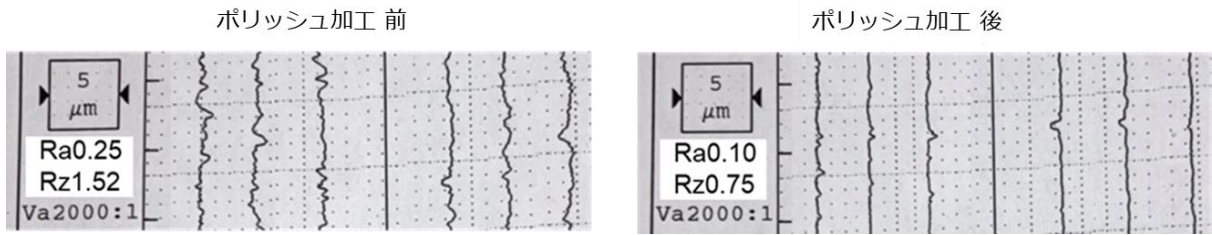


図8：ラジアル切込み 0.1mm における表面粗さ

5.2 主軸回転数の影響

主軸回転数の影響について述べる。前章で述べたように、主軸回転数は図4の条件 No.2、6、7、8の4段階にて変化させた。図9に主軸回転数が面粗度に及ぼす影響を示す。すべり速度 3m/s、主軸回転数 $1,500\text{min}^{-1}$ が最も面粗度が小さく、その後、主軸回転数が上がるにつれて面粗度は大きくなり、24m/s、 $11,945\text{min}^{-1}$ では再び面粗度が小さくなった。図9の黒線は加工時間を示す。 $1,500\text{min}^{-1}$ では 230 秒であるが、 $11,945\text{min}^{-1}$ では 29 秒まで短縮される。この結果から、 $11,945\text{min}^{-1}$ にて加工することで、 $1,500\text{min}^{-1}$ と同程度の小さな面粗度を、7.9 倍の高い生産性にて得られることが分かる。

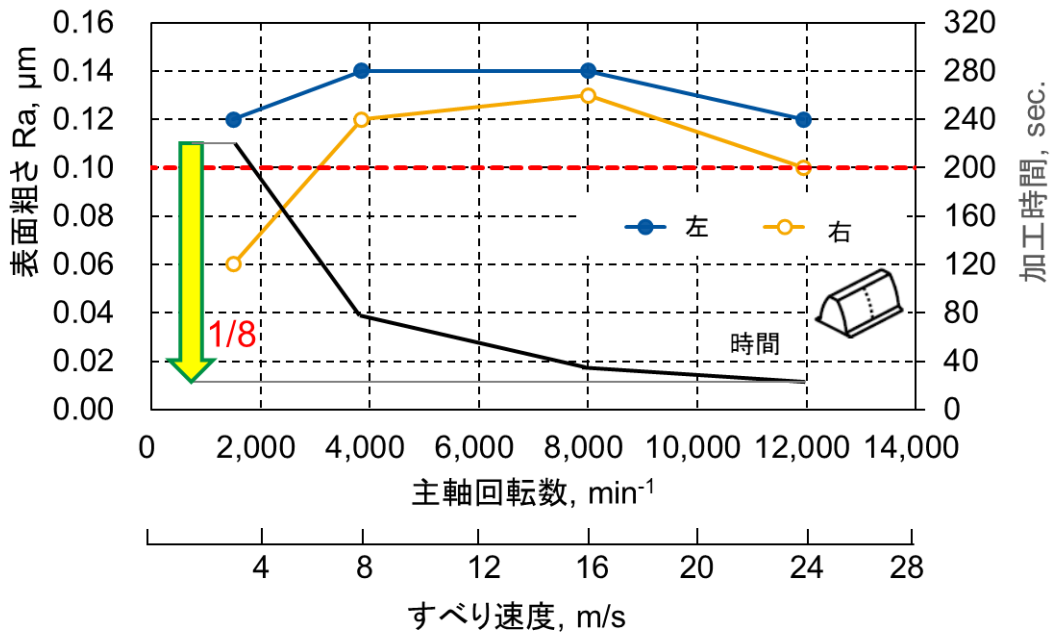


図9 主軸回転数とすべり速度の影響

5.3 アクシヤル送りの影響

本章では、アクシヤル送りの影響について述べる。前章で述べたように、アクシヤル送りは図4の加工条件 No.2、9の2段階に変化させた。軸方向送りを 0.02mm/part-rev. から 0.04mm/part-rev. に増加させると、左歯面の表面粗さは Ra0.12 から 0.11 に 8%減少し、右歯面の表面粗さは Ra0.06 から 0.08 に 33%増加した。これは、左右の歯面を別々に異なるアクシヤル送りにて加工することで、狙いとする表面粗さを得られる可能性があることを示している。

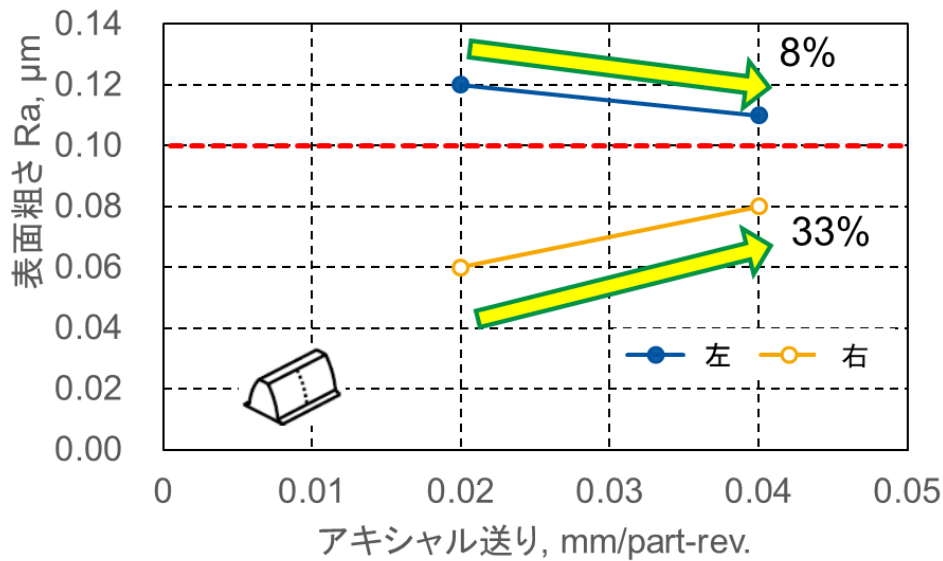


図10 アキシャル送りの影響

5.4 研削焼け評価

ポリッシュ加工後に全てのワークに対してナイタルエッチング検査を行い、どの加工条件においても研削焼けが発生していないことを確認した。図11にナイタルエッチング検査結果の抜粋を示す。

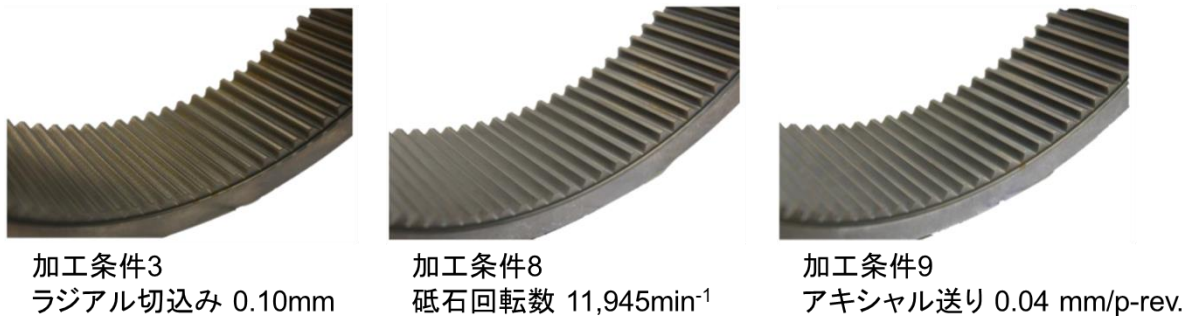


図11 ナイタルエッチング検査結果

6. まとめ

初の連続創成方式による内歯車のポリッシュ加工を行い、次の結果を得た。

砥石回転数、ラジアル切込み、アキシャル送りの3つのポリッシュ加工条件の変数が歯車の形状、面粗度へ与える影響を調査した。ラジアル切込み量が面粗度へ与える影響は強く、ラジアル切込み量の増加により面粗度は小さくなる。ラジアル切込み量を0.1mmにて目標とする $Ra0.1\mu\text{m}$ を満足し、更にラジアル切込み量0.15mmにて $Ra0.05\mu\text{m}$ を得られる。またラジアル切込み0.15mmが、ポリッシュ加工によって歯車形状を変化させない限界値である。

砥石回転速度が $1,500\text{min}^{-1}$ から増加するにつれて面粗度は増加したが、 $8,000\text{min}^{-1}$ を超えると $1,500\text{min}^{-1}$ と同程度まで再び減少する傾向がある。砥石回転数は生産性に直結する指標であり、 $11,945\text{min}^{-1}$ の加工時間は $1,500\text{min}^{-1}$ の $1/8$ に相当する。

アキシャル送りは、左右歯面にて与える影響が異なった。アキシャル送りを 0.02mm から 0.04mm に変更すると、面粗度 Ra は右歯面で 33%増加したが、左歯面では 8%減少した。

実施した全てのポリッシュ加工条件において、研削焼けは認められなかった。

以上の結果から、ラジアル切込み 0.10~0.15mm、砥石回転数 11,945 min^{-1} 、アキシャル送り 0.02~0.04mm/p-rev.の組み合わせが、Ra0.1以下の面粗度を最も高い生産性にて得られることが期待できる（図 12 参照）。

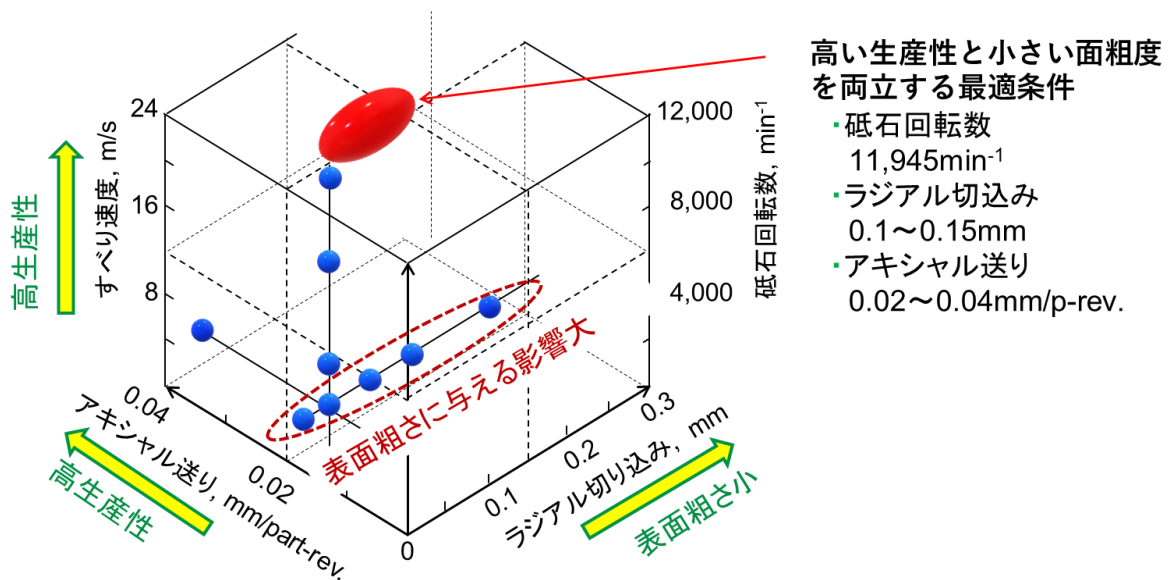


図 12：最適なポリッシュ加工条件

7. 今後の展望

次のステップとして、本研究で得られた最適なポリッシュ加工条件の確認テスト、同一加工条件でのばらつき評価を実施する。更に、対象とするポリッシュ加工用砥石の種類を広げると共に、Rpk、Rvk等の異なる面性状パラメータでの評価を行い、各種減速機から歯車表面に求められる仕様を実現させていく。

8. 参考文献

- [1] Klocke, F.; Brecher, C.: Zahnrad- und Getriebetechnik. Auslegung – Herstellung – Untersuchung – Simulation. Munich: Hanser 2017
- [2] Pinnekamp, B.; Heider, M.; Beinstingel, A.: Dynamic behavior of planetary gears. Power transmission engineering, June 2020, p.42-47.
- [3] Ahmad, M.; Brecher, C.; Löpenhaus, C.: Einflussanalyse von langwelligen Abweichungen auf das Anregungsverhalten von Getrieben für Elektrofahrzeuge. Schweizer Maschinenelemente Kolloquium, 2018.
- [4] Ophrey, M.; Reimann, J.: Prediction of surface zone changes in generating gear grinding. AGMA Technical Paper, 2014.
- [5] Reimann, J.: Randzonenbeeinflussung beim kontinuierlichen Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen. Doctorate Thesis, RWTH Aachen, 2014.
- [6] Lang, Martin.; Load carrying capacity of superfinished tooth flank surfaces depending on function-oriented roughness parameters, RWTH Aachen, 2022
- [7] Fujimura, N.; Hard Finishing – Internal generating gear grinding as a hard finishing process enables significant noise, vibration and harshness improvements in EV transmissions, technical magazine, Transmission Technology International, Dorking 2021, p.63-64
- [8] Fujimura, N.: Practical analysis on productivity of grinding tools in the process of internal generating gear grinding, 4th International Conference on Gear Production 2021
- [9] Fujimura, N.: Practical analysis of productivity of grinding tools in the process of internal generating gear grinding, 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '22,
- [10] Yanase, Y.; Ochi, M.; Nakamichi, Y.; Nishimura, U.; Ashizawa, Y.: The World's First Machine for Grinding Internal Gears in Planetary Gear Systems. MHI Technical Review Vol. 46 No. 3: 2009
- [11] DIN ISO 1328-1 - 2018-03 Cylindrical gears - ISO system of flank tolerance classification, Beuth Verlag 2018