

B2 Machining

歯車の加工コストと環境負荷を低減する

「エアスカイビングシステム」

"Air Skiving System"

Reducing the cost of gear cutting and environmental burden

キーワード | スカイビング加工・ドライ加工・エアーユニット
ドライスカイビングカッタ・工具費低減・環境負荷低減

工具事業部／工具技術部

山崎 格 Itaru Yamazaki

工作機事業部／工作機技術部

余湖 健志 Takeshi Yogo

要 旨

NACHIは、スカイビング加工に使用する工具と工作機械の双方を自社開発してきた強みを活かし、切削油剤を使用しない「ドライ加工」が工具寿命の延長に極めて有効であることを発見した。今般、その効果を最大限に発揮する方法として、新たに開発した「エアスカイビングシステム」を活用することで、大幅な加工コスト低減を実現し、さらに、環境負荷低減に貢献する。

Abstract

Utilizing the strength of in-house development for skiving cutters and machine tools, NACHI has come to discover that the dry machining without use of cutting fluid was quite effective in prolonging a life of a cutting tool. NACHI's newly developed, "Air Skiving System" achieves substantial decrease of the machining cost and contributes to reduction of environmental burden, exhibiting the effectiveness of dry machining to the maximum.

1. 「エアスカイビングシステム」 開発の背景

近年、歯車加工法においてスカイビング加工は、複合加工機での歯車加工を実現し、多品種に及ぶ歯車を効率良く生産できることから、自動車部品や建設機械部品、減速機部品で普及がすすんでいる。スカイビング加工の原理は、ワークに対して、工具を傾けて配置し、歯数比に対応した速度で同期回転させ、工具に送りを与える。ワークと工具の回転軸が交差しているため、ワークと工具の間にすべりが発生し、そのすべりを利用して切削する工法である(図1)。スカイビング加工は、高精度、高能率というメリットがある一方で、工具刃先への加工負荷が大きく、工具寿命において課題があった。

外歯車を加工する工法にはホブ加工があり、2000年頃にドライ加工の研究がすすみ、ウェット加工からドライ加工に切り替えることにより工具寿命は大幅に伸び、多くの生産ラインで採用されていることが知られている。スカイビング加工は、一般的にウェット加工でありドライ加工とすることで同様の効果が考えられるが、ドライ化がすすんでいない理由としては、ワークと工具の間で切りくずの噛み込み現象が起きやすく、工具寿命が低下する恐れがあるからである。

このような背景のなか、NACHIはスカイビング加工に使用する工具と工作機械の双方を自社開発してきた強みを活かし、切削油剤を使用しない「エアスカイビングシステム」を新たに開発した。

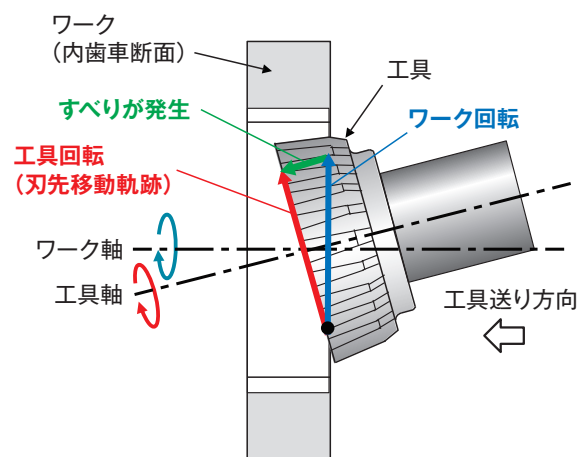


図1 スカイビング加工の原理

2. スカイビング加工における課題

スカイビング加工は、他の歯車加工法(ホブ加工、ギヤシェーパ加工、ブローチ加工)に比べ、工具刃先の切削荷が大きく、高温の切削熱が発生するため、刃先が早期摩耗に至ることで工具寿命が短くなる。これまで、この課題を解決するために、工作機械では加工条件の最適化や機械剛性の向上、工具では材料やコーティングの改良、形状の最適化などをすすめてきたが、その効果は限定的であった。

現在、スカイビング加工は切削油剤を使用したウェット加工が主流である。工具の摩耗メカニズムの

解明をすすめていく中で、1刃あたりの温度上昇をみると、断続切削の加工中に切削油剤による加熱冷却の繰返しによって熱衝撃が起こり、工具すくい面のコーティングに無数の亀裂を発生させ、その亀裂が拡大することで短寿命となることを発見した。

そこで熱衝撃を緩和させるため、要因となる切削油剤を廃止しドライ加工を行なったところ、刃先からワークが離れても温度変化が小さく工具寿命を改善させる効果があることを確認した。(図2)

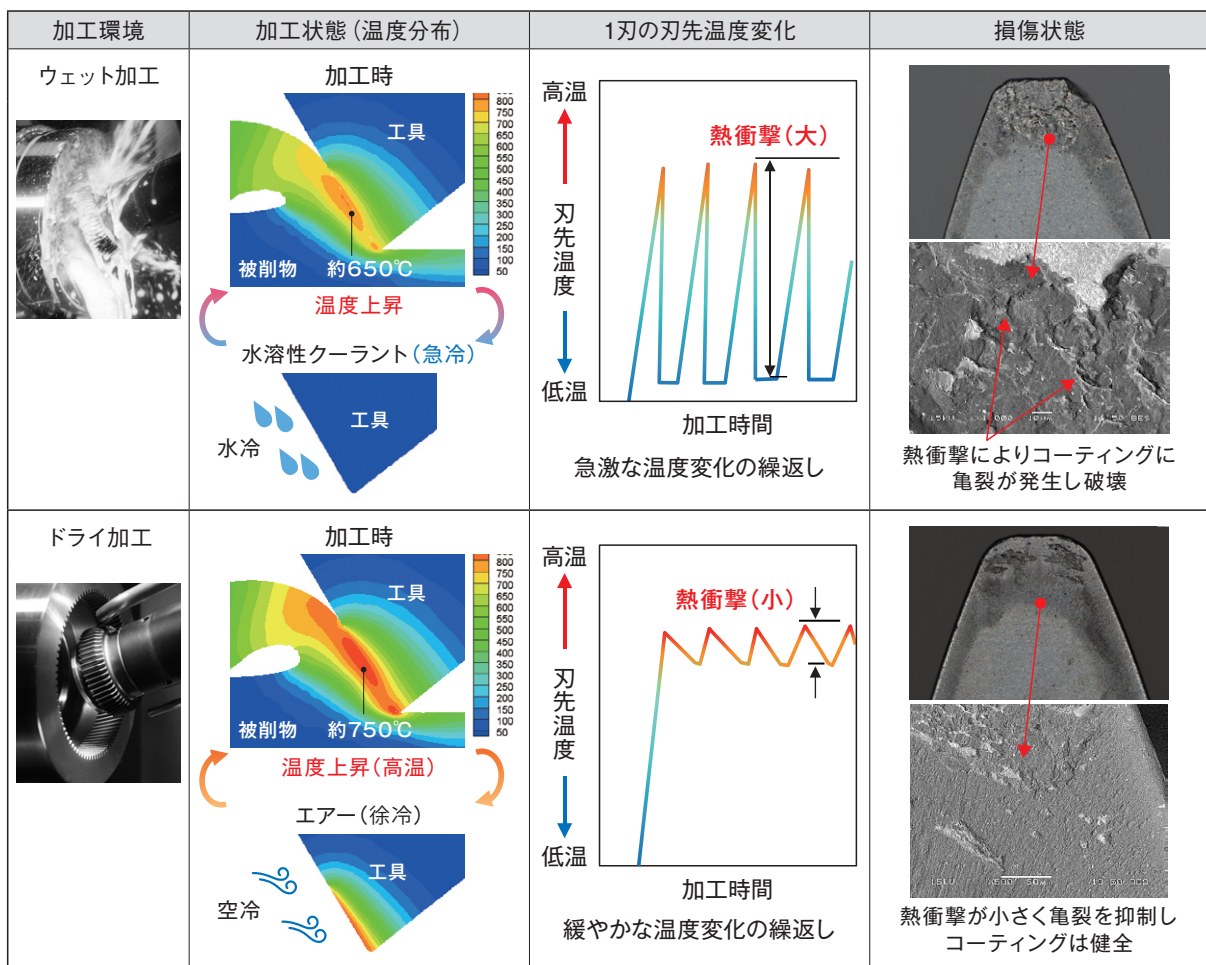


図2 従来ウェット加工とドライ加工の工具摩耗メカニズム

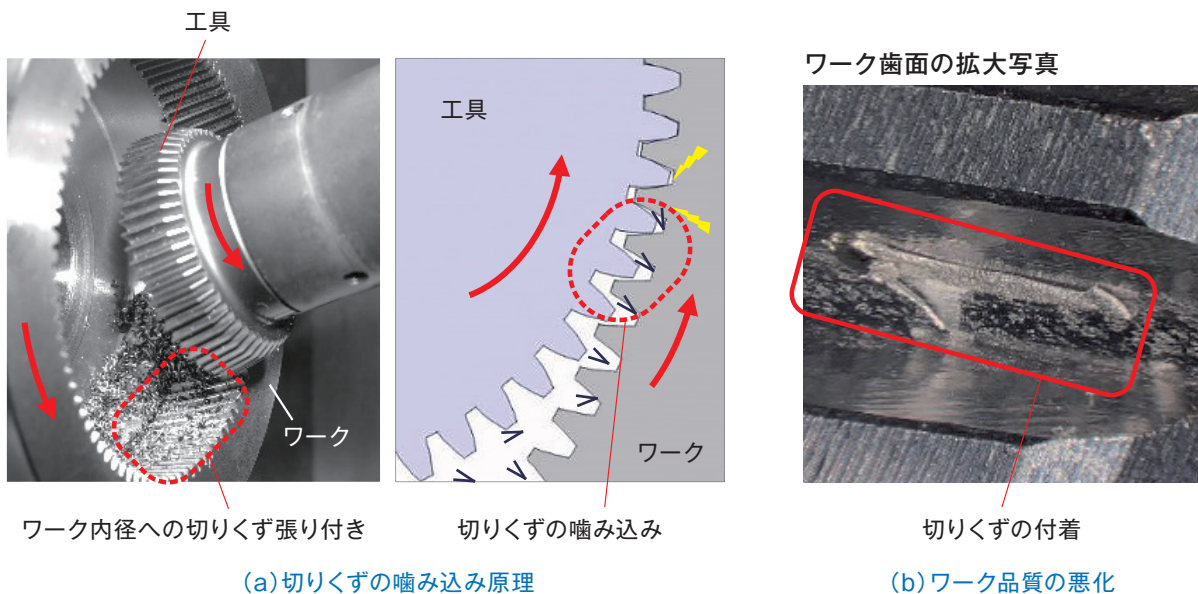
3. ドライスカイピング加工の課題

ドライ加工では、切削加工で発生した切りくずが、ワーク回転による遠心力で内径に張り付いたり、ワークの中で舞い上がり切削点に入り込んだりすることで、ワークと工具の間に切りくずが噛み込みやすく、ワーク品質の悪化(切りくずの付着)や工具切れ刃の欠損につながる。(図3)

また、2項で述べたようにドライスカイピング加工では

ウェット加工に比べ、熱衝撃は小さくなるものの、刃先はより高温になり、常に高い温度がかかるため、熱による工具摩耗がすすみやすくなる。これらのことから、スカイピング加工のドライ化を実用化するには、

- 1) 切りくずの噛み込みを抑制する技術
- 2) 高温環境下で耐久性の高い工具が必要といえる。



工具を外周側から見た拡大写真

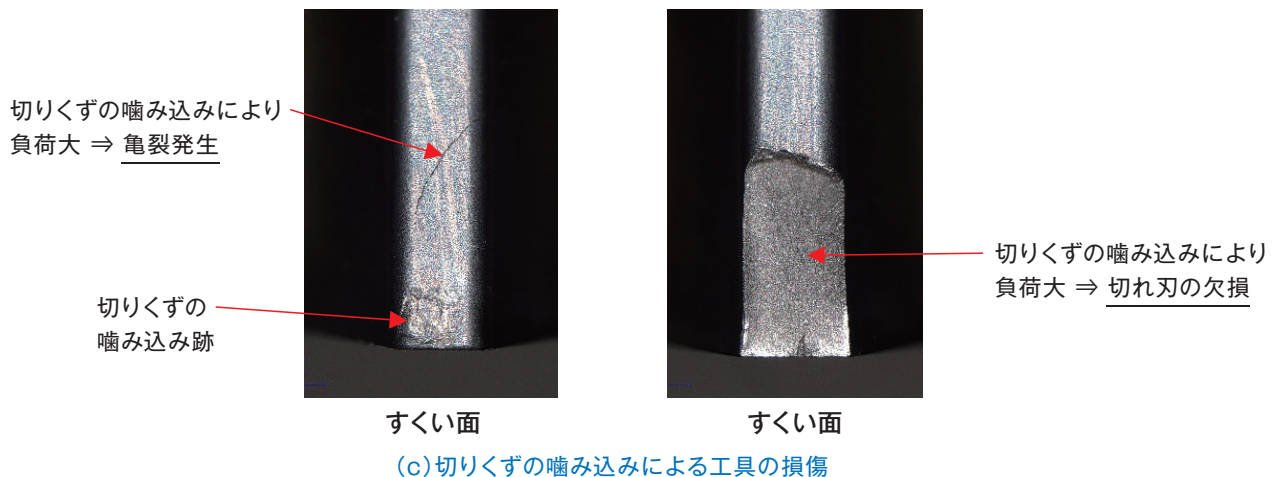


図3 ドライ加工時における切りくずの噛み込みによる影響

4. ドライ加工の実用化に向けて

4-1) 切りくずの噛み込みを抑制する技術

(1) 切りくずを除去するためのエアーカー

ワーク内径に張り付いた切りくずを除去するためには、ワークの回転速度 v と切りくずの質量 m によって決まる遠心力 F_n に摩擦係数 μ を乗じた接線力 F_t より大きいエアーカー力 F_a を与えることで除去することができる(図4)。ワーク内径 $\phi 107$ 、切りくずの質量 $0.008g$ の時の

遠心力 F_n 、接線力 F_t を図5に示す。速度が大きいほど、大きなエアーカー力が必要であり、約 $5mN$ 以上のエアーカー力が必要であることが確認できる。エアーカー力 F_a は、ノズル径とエアーカー圧力によって決まり、接線力 F_t より大きいエアーカー力を設定する必要がある。

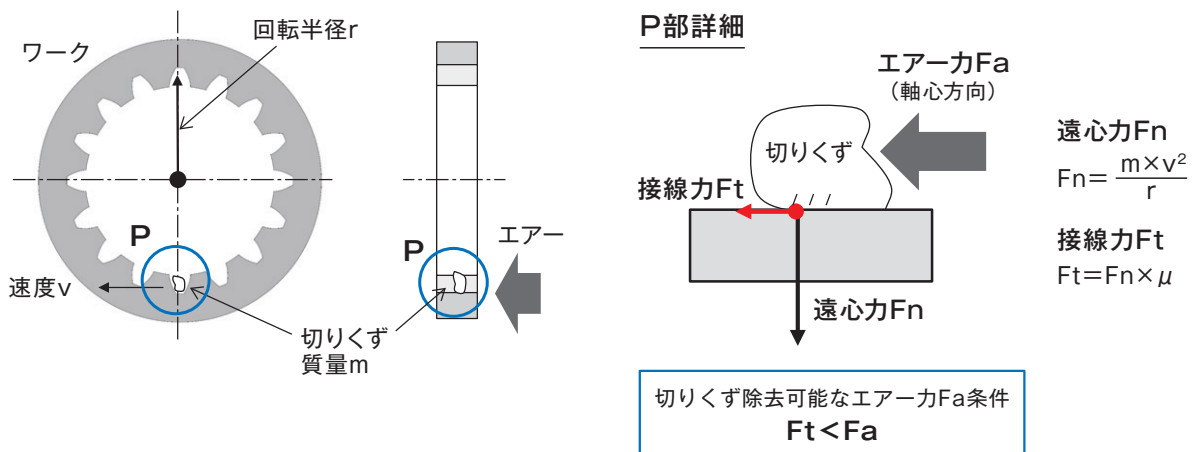


図4 遠心力で張り付いた切りくずを除去する力

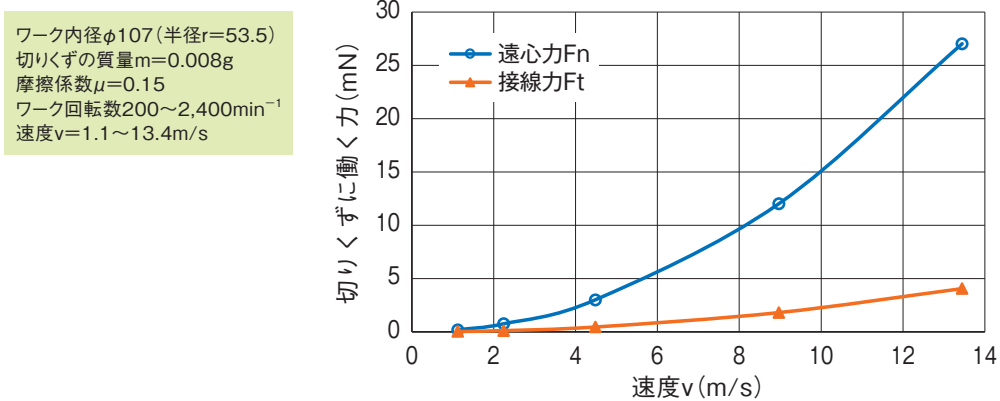


図5 切りくずの働く力(例)

ワーク内径 $\phi 107$ (半径 $r=53.5$)
 切りくずの質量 $m=0.008g$
 摩擦係数 $\mu=0.15$
 ワーク回転数 $200 \sim 2,400 \text{min}^{-1}$
 速度 $v=1.1 \sim 13.4 \text{m/s}$

(2) エアユニットによる切りくずの除去

切りくず噛み込みのメカニズムは前述のとおり、

- (a) ワークの内径に張り付いた切りくずの噛み込み
- (b) 空中を舞っている切りくずの噛み込み

に層別できる。

この二つの問題を解消するのが、新たに開発した「エアユニット」であり、「エアユニット」は外部ノズルとエアークャップで構成される。(図6)

(a) ワーク内径に張り付いた切りくずは、外部ノズルから噴出するエアールによって除去する。

(b) 空中を舞っている切りくずは、工具先端に設置されたエアークャップを用いることで、エアカーテン効果(空気の壁)により噛み込みを防止する。

図7は、「エアユニット無し」と「エアユニットあり」の切りくずの状態を比較したものである。エアユニット無しでは、加工中に遠心力で切りくずが張り付いているのに対し、エアスカイピングでは、切りくずの張り付きが発生していないことが確認できる。

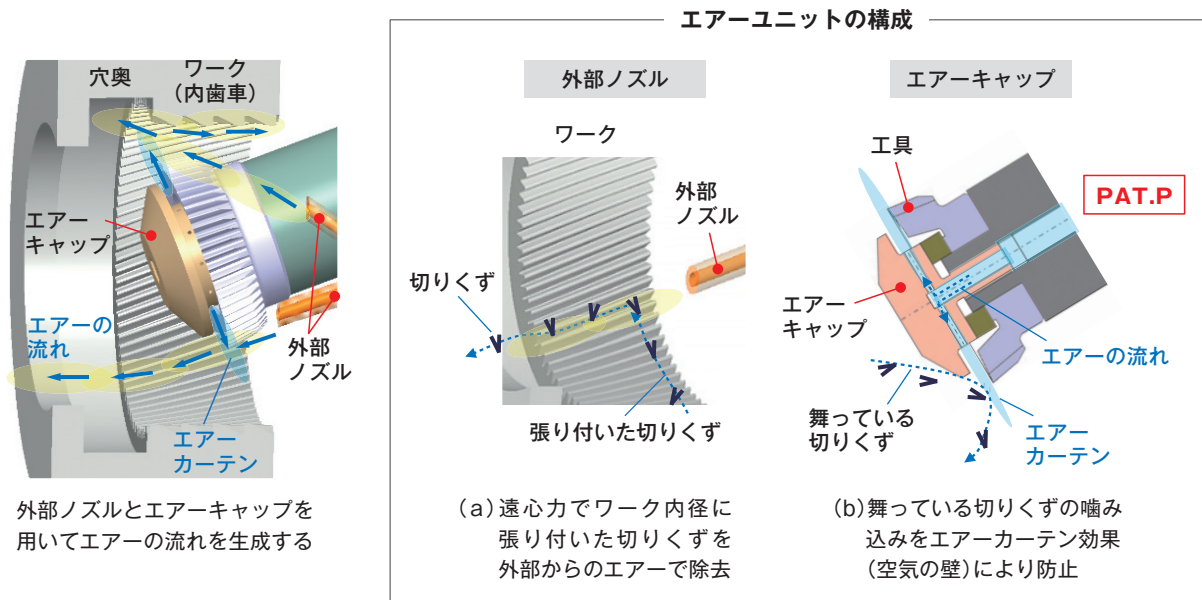


図6 エアユニットの構成

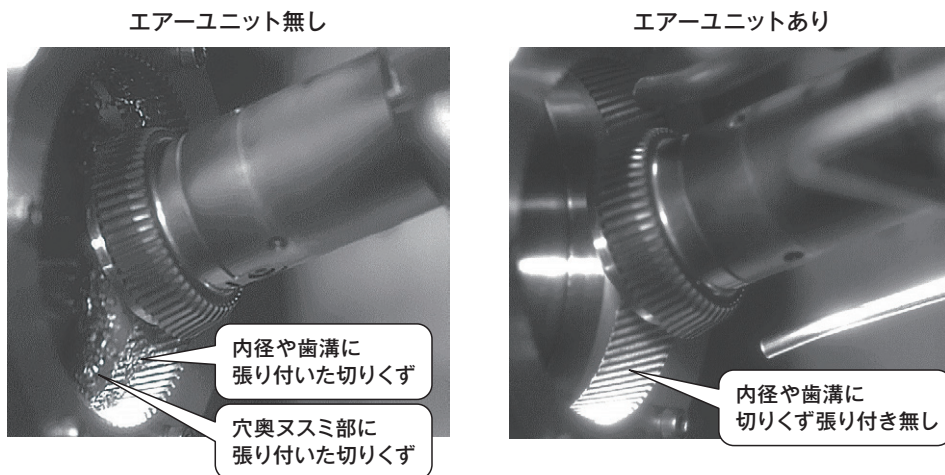


図7 エアユニットの効果確認

(3) 様々なワーク形状に対応できるエアユニット

スカイビング加工されるワークには様々な形状があり、エアユニットは、ワーク形状にあわせ最適な構成を設定する。図8にその例を示す。

(1) 貫通穴形状 内歯車

貫通穴形状の内歯車で、とくに歯車の奥にヌスミがある場合には、内径に切りくずが張り付くことに加え、ヌスミ部に切りくずが堆積し、噛み込むという課題がある。このような場合は内径を直接ねらう外部ノズル(a)に加えて、ヌスミ部を狙って切りくずの堆積を除去する外部ノズル(b)を追加する。

外部ノズル(a)と(b)、エアキャップにより、内径に張り付いた切りくずの除去、ヌスミ部に張り付いた切りくず除去、舞っている切りくずの噛み込みを防止することが可能となる。

(2) 止まり穴形状 内歯車

止まり穴形状の内歯車では、内径を狙った外部ノズルとエアキャップにより、積極的に切りくずをワーク外に排出する空気の流れを生成し噛み込みを防止する。

(3) 段付き形状 外歯車

段付き形状の外歯車では、切りくずが張り付く内径は存在しないが、小歯車加工時の位置と大歯車側面のすきまが小さいため、発生した切りくずが大歯車側面で跳ね返り、噛み込みが発生する。跳ね返った切りくずの噛み込みを防止するために、外部ノズル、エアキャップは有効である。

(1)～(3)で示したように、ワーク形状にあわせた最適な構成を構築することが可能であり、その効果も実証済みである。

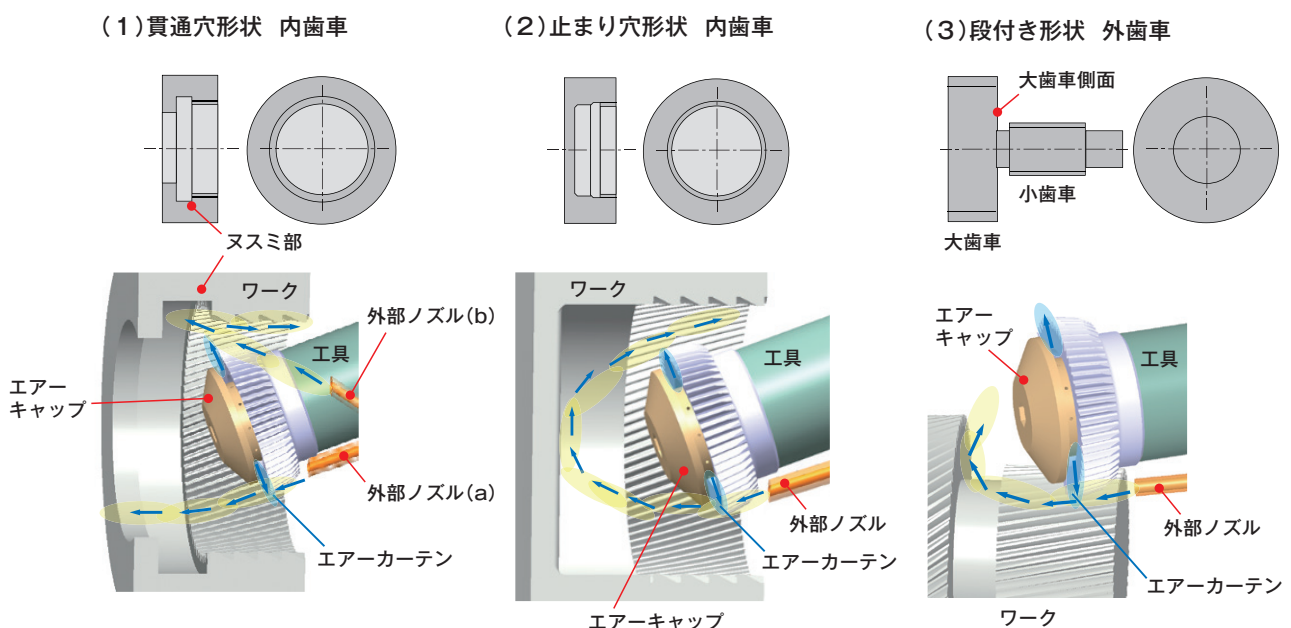


図8 用途に応じたエアユニットの設定

4-2) ドライ環境下で耐久性を発揮するスカイピングカッタ

(1) ウェット加工とドライ加工の切りくず形態の違い

図9にウェット加工とドライ加工の切りくずの比較を示す(合金鋼SCM420と炭素鋼S45C)。ウェット加工時は、切りくずの色が被削材加工前の銀色であるのに対し、ドライ加工では、茶褐色や青色になっていること

から、切りくずが高温になっている様子をうかがえる。その高温になった切りくずは、工具すくい面と常に接触するため、スカイピングカッタのすくい面には、高い耐熱性と耐摩耗性が要求される。

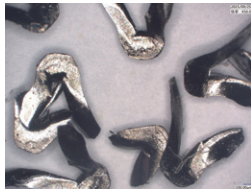



被削材	ウェット加工	ドライ加工
合金鋼 SCM420	 銀色	 茶褐色 (350°C以上) 高温
炭素鋼 S45C	 銀色	 濃青色 (530°C以上) 高温

図9 ウェット加工とドライ加工の切りくず比較

(2) ドライスカイピングカッタ

常に工具の切れ刃が高温となるドライ加工環境下で性能を得るために、工具表面のコーティングは耐熱性と耐欠損性に特化した複合膜であるHyper DS1(ハイパーディーエスワン)を新たに開発した(図10)。さらに、表層には平滑化処理を実施することで、摩擦力低減による発熱の抑制、耐溶着性を向上させた。

ドライ環境下において、Hyper DS1は、従来のAlCr系単層コーティングに対し、すくい面のクレター摩耗を

抑制し、切れ刃の欠損を抑制する効果が見られる(図11)。工具に使用する材料は、耐摩耗性を発揮する粉末ハイスを使用し、これらの組みあわせにより、「ドライスカイピングカッタ」は耐熱性と耐摩耗性を有し、ドライ加工での寿命を大幅にのばすことが可能となる。

ドライ加工専用のコーティング Hyper DS1

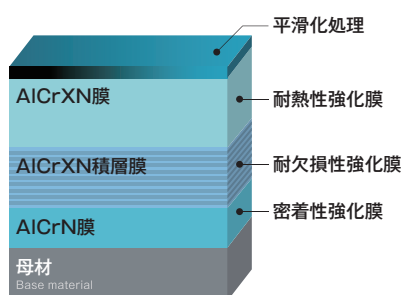


図10 Hyper DS1の膜構成

コーティング違いによる切れ刃摩耗(欠損)の比較(切削長15m加工後)

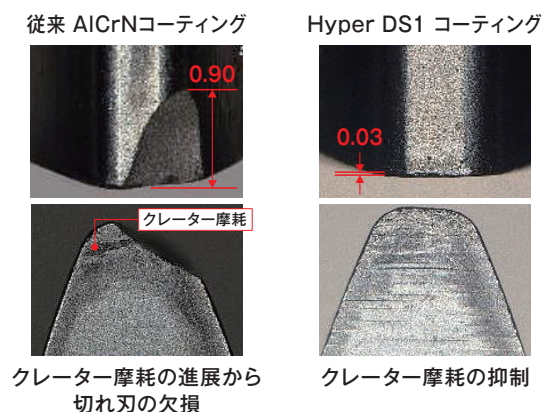


図11 ドライ環境下におけるHyper DS1の性能

5. 環境負荷低減の効果

エアユニットとドライスカイビングカッタを用いたドライスカイビング加工では、従来のウェット加工で必要であったクーラントポンプ、オイルコントローラが不要となり、その消費電力に対するメリットは大きい。あわせて、切削油剤の購入費の削減、廃棄にかかる費用も削減できるためコスト低減に効果がある。図12に環境負荷低減の例を示す。電力消費量、切削油廃棄にかかる

エネルギー、切削そのものによる電力消費をCO₂換算すると、従来の水溶性加工に対してドライ加工では、年間約41%のCO₂排出量の削減が可能となる。これによりスカイビング加工のドライ化は、加工コスト(ランニングコスト)低減だけではなく、環境負荷の低減にも貢献できる。

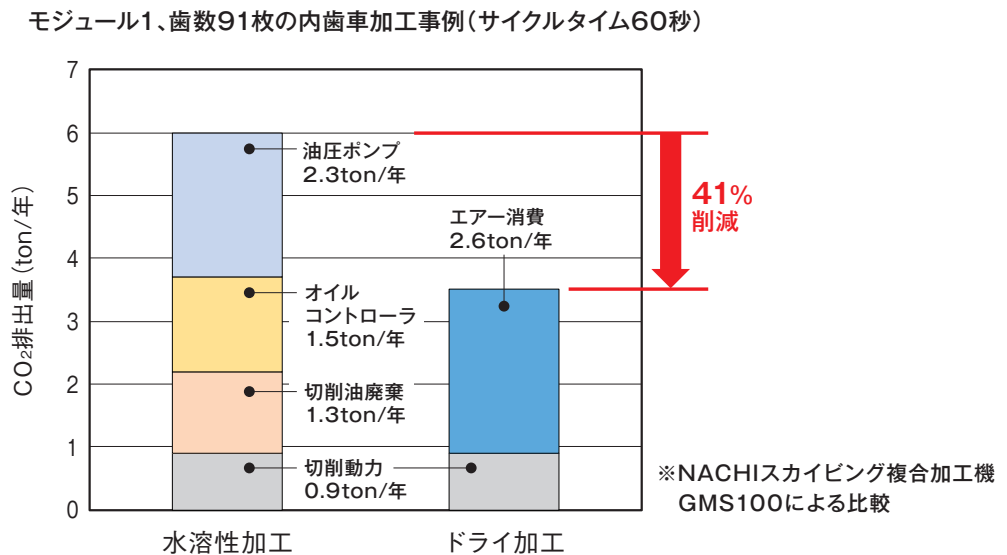


図12 CO₂排出量削減効果

6. 「エアスカイピングシステム」

量産ラインに向けて最適なドライスカイピング加工を提案するために、ここまで説明した「エアユニット」と「ドライスカイピングカッタ」を組みあわせて、2025年8月に「エアスカイピングシステム」として商品化した(図13)。

「エアスカイピングシステム」を使用したドライスカイピング加工では、従来のウェット加工に対し熱衝撃が緩和され工具刃先の摩耗を大幅に抑制でき、また、工具の耐熱性と耐摩耗性をさらに向上したことから、従来

ウェット加工比で5倍の切削長(工具寿命)を達成した(図14)。これにより、ウェット加工からドライ加工に切替えることで、大幅な加工コスト(ランニングコスト)の低減効果を得ることができる。

本システムは、NACHIのスカイピングギヤシェープセンタ「GMSシリーズ」全型式に搭載することができ、既設のGMSシリーズへの追加搭載も可能である。



図13 「エアスカイピングシステム」の構成

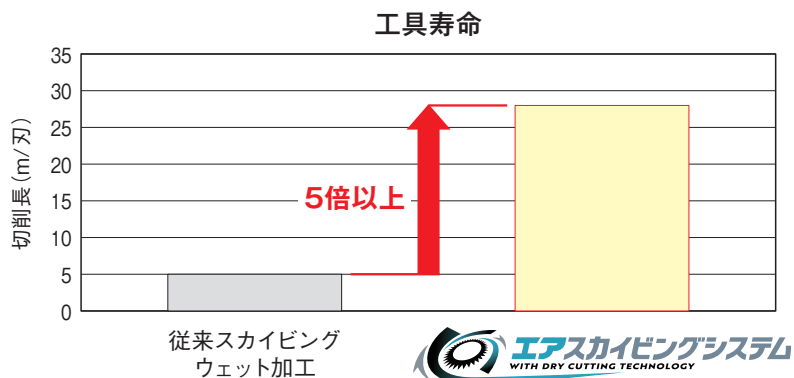


図14 ウェット加工とエアスカイピング加工の寿命比較

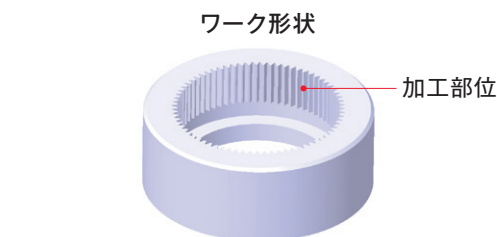
7. 「エアスカイピングシステム」の加工事例

大型減速機用の内歯車をギヤシェーパ加工から「エアスカイピングシステム」に置き換えることによる高能率化と工具寿命向上の事例を紹介する。

従来、図15(左)のようなヌスミ付きの内歯車を、ギヤシェーパで加工しており、加工時間はワーク1個あたり45分かかっていた。加工時間短縮のため、スカイピング加工法の採用にとり組み、加工時間が15分となり67%の時間短縮ができたものの、工具寿命は、ギヤシェーパ加工120個に対し、ウェット環境下での

スカイピング加工では50個と1/2以下になり、工具費が大きな課題であった。そこで「エアスカイピングシステム」を採用することで、加工時間は15分のままで、工具寿命は330個となり、ウェット加工比で5倍以上、ギヤシェーパ比では2.5倍以上の長寿命化を実現した。

このように、「エアスカイピングシステム」はギヤシェーパ加工からの置き換えとして、非常に有効であることが分かる。



加工条件

ワーク	用途	建設機械向け減速機
	材質	SCM440相当
	諸元	m3.2×PA20×NT72
スカイピング加工条件	交差角	20°
	すべり速度	80m/min
	切込み	6パス
	送り	0.2～0.5mm/rev
加工設備	GMS450(立型)	

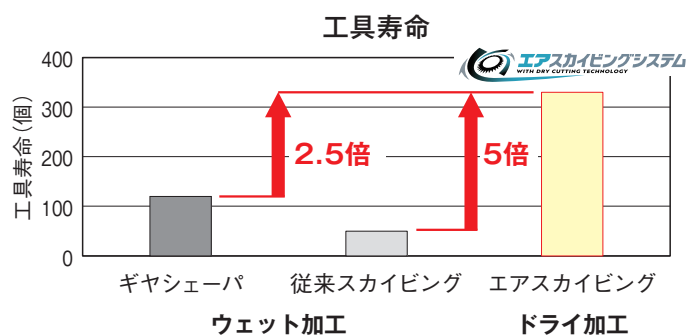
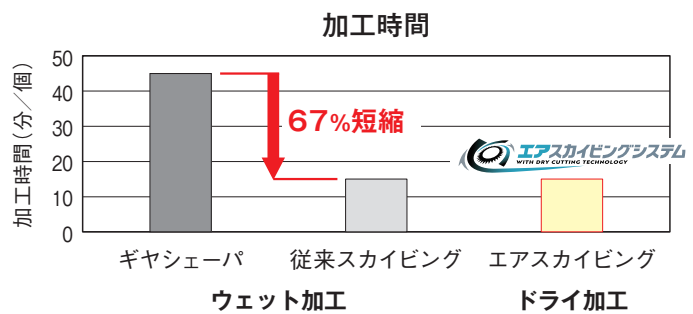


図15 ギヤシェーパとの比較事例

8. 最後に

「エアスカイピングシステム」を活用したドライ加工は、歯車加工における加工コストと環境負荷を抑制することができる技術である。また、加工現場の省エネルギー化や廃棄物削減といった点においても、ドライ加工を導入することで経済性と環境対応の改善が可能となる。今後は、様々な歯車形状への対応や他の材質への適用拡大を図り、さらなる加工安定性の向上と工具寿命の延伸をめざした技術開発をすすめていく。