

NACHI-BUSINESS

Machining **news**

Vol. **1** A1
December/2003
創刊号

マシニング事業

■ 論文・報文・解説

「DLC膜の切削工具への適用」

Application of DLC Coatings
to Cutting Tools

〈キーワード〉 ドライ加工・コーティング工具・DLC (Diamond Like Carbon) 膜
PVD (Physical vapour deposition) 法・アルミニウム合金

機械工具事業部／サーモテック課
園部 勝

要 旨

環境問題への意識の高まりに伴って、切削油剤を使用しない「^{※1}ドライ加工」の実現は大幅な省エネルギー効果が得られるだけでなく、^{※2}有害物質の削減という点でも注目されている。

アルミニウムの切削加工の分野では被削材が刃先に溶着しやすいため一般的なコーティング工具では「ドライ加工」はむずかしい。このような状況のなかで、^{※3}DLC (Diamond Like Carbon) 膜の優れた低摩擦係数に注目し、アルミニウム合金の「ドライ加工」用コーティング膜として^{※4}Me-DLC膜を開発したのでその優位性に関して考察した。

Abstract

As awareness of environmental issues has intensified over the years, "dry cutting" which does not require the use of cutting fluid, has been attracting attention as it greatly reduces both energy requirements and toxic substance levels.

Dry cutting is difficult with standard coatings when milling aluminum, because the material being milled tends to weld to the cutting edges. This paper studies diamond-like carbon (DLC) coatings, whose low friction coefficient has caused them to gain much attention as a countermeasure to the situation described above, and the outstanding performance of the Me-DLC coating, which we developed as a coating for dry milling of aluminum alloys.

1. はじめに

近年、環境問題への意識の高まりに伴って製造業の分野でも省エネルギー、省資源、有害物質の低減への取り組みが行なわれつつある¹⁾。製造業における省エネルギーの取り組みでは加工能率の向上が求められ、高能率加工が可能な工具が要求されてきた。ところが、図1に示すように現状のマシニングセンタ (MC) における消費電力の50%はクーラントポンプの駆動に費やされており、実際の切削加工を行なうための主軸動力の消費電力は20%程度にすぎない^{2,3)}。

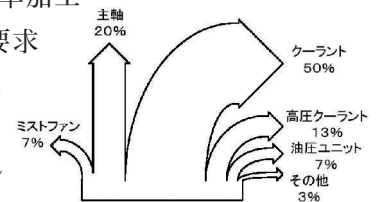


図1. マシニングセンターの消費電力の50%はクーラントポンプの駆動に費やされており、実際の切削加工を行なうための主軸動力の消費電力は20%程度にすぎない^{2,3)}。

このため切削油剤を使用しない「ドライ加工」の実現は大幅な省エネルギー効果が得られるだけでなく、有害物質の削減という点でも注目されている。現在、「ドライ加工」は歯切り工具の分野で急速な広がりを見せているが、他の切削工具においても「ドライ加工」への要求が高まってきている。表1に示すように、エンドミルを手始めとしてドリルやタップなどの「ドライ加工」が一部ですでに実施されており、今後、ますます普及するものと思われる。

表1. 被削材、工具別のドライ化の現状

工 具	鋼	鋳物	アルミニウム合金
ドリル	可能	可能	困難
エンドミル	可能	可能	困難
リーマ	不可	困難	不可
タップ	困難	可能	不可
ホブ	可能	—	—
シェービング	不可	—	—
ブローチ	困難	困難	—
フォーミングラック	可能	—	—



2. アルミニウム合金の「ドライ加工」

アルミニウムの切削加工の分野では、切削中に被削材が刃先に溶着しやすいため一般的なコーティング工具を用いた「ドライ加工」はむずかしい。このような状況のなかで、DLC (Diamond Like Carbon) 膜が開発され、その特性が明らかになっていくと同時に、DLC膜の優れた低摩擦係数が注目されるようになってきた³⁻⁷⁾。

ところが、DLC膜にはその製法や目的によっていろいろな種類が存在し⁴⁻¹⁴⁾、たとえば硬さを例にとると、1,000HV以下の軟質膜から8,000HV以上のほぼダイヤモンド膜に相当する硬質膜まで存在する。図2に代表的なDLC膜とその特徴を示す。

切削工具への適用を考えた場合、潤滑性と同時に耐摩耗性も要求されるため高硬度なDLC膜が望ましいが、水素を含まない純粋なアモルファスDLC膜は膜硬度が高い反面、膜自身の内部応力も高く母材への密着力も低い。このため、切削工具への適用には母材との密着性の高いTiやCr, Siなどの金属を添加した金属含有Me-DLC膜が使用される場合が多い¹¹⁻¹⁴⁾。

アルミニウム合金の「ドライ加工」用コーティング膜としてのMe-DLC膜の優位性に関して、各種アルミニウム合金に対する従来の硬質膜とMe-DLC膜の摩擦特性を以下に述べる。



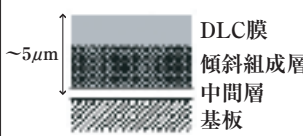
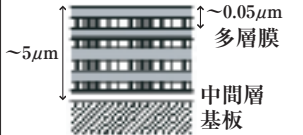
名称	被膜構成と膜厚	組成	硬さ [GPa]	
単層DLC	 ~2μm DLC膜 50Å~2μm 基板	a-C:H	15~50	(主に超硬合金製) 塑性加工金型、ガラス成形金型、断裁刃物、各種しゅう動部品、治工具、切削工具、装飾部品、精密測定器部品
		ta-C (tetrahedral amorphous)	50~80	切削工具
中間層付きDLC	 ~2μm DLC膜~2μm 中間層~0.2μm 基板	Me/a-C:H Si SiC Cr/Ti Cr Nb ...	15~50	(主に工具鋼製) 塑性加工金型、プラスチック射出成形金型、ひげそり刃、弱電機部品、各種しゅう動部品、治工具、装飾部品
傾斜組成Me-DLC	 ~5μm DLC膜 傾斜組成層 中間層 基板	Me-C:H/a-C:H Ti Cr≤10at.% W ...	10~25	燃料噴射ポンプ、歯車、軸受、ポンプスクリュー、ベーン、ピストンリング、ピストン、人工関節、プラスチック射出成形金型、各種しゅう動部品、治工具
多層膜Me-DLC	 ~0.05μm 多層膜 ~5μm 中間層 基板	(Me-C:H/a-C:H) _n n: 複層回数 Ti Cr≤10at.% W ...	10~25	

図2. 各種DLC 膜の被膜構成と応用分野 [出典:文献5]

(各種被膜とアルミニウム合金のしゅう動特性)

図3は、摩擦特性の測定に使用された^{※6}ピンオンディスク試験装置の模式図である。ピンオンディスク試験は表2に示す条件で20秒間(40m)行ない、開始2秒後の時点での摩擦力から摩擦係数を求めた。

表2.ピンオンディスク条件

ピン材種	ADC12, AC4A, 5052, 7075, 2024
荷重	4.0kg
速度	1,000rpm (120m/min)
基材材料	SKH51
被膜	CrN, TiAlN, TiC, Si-DLC, Ti-DLC

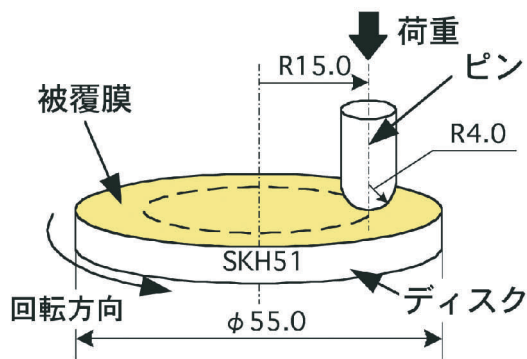


図3.ピンオンディスク試験装置

図4は、アルミニウム合金ピンと従来の硬質膜およびMe-DLC膜の摩擦係数の測定結果であり、図5は試験終了後のピンと被膜表面の観察例である。

従来の硬質膜は、アルミニウム合金の切削油剤を用いた「ウェット切削」によく用いられるCrN膜と鋼のドライ切削によく用いられるTiAlN膜、炭素系のTiC膜を、高速度工具鋼SKH51上に被覆した。Me-DLC膜はTiおよびSiを下地とした傾斜組成DLC膜をPVD(Physical vapour deposition)法により被覆した。

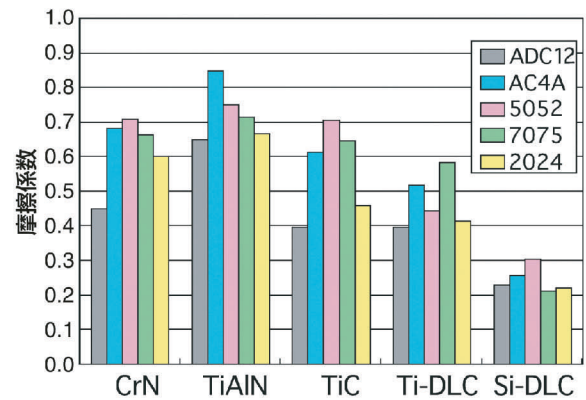


図4.アルミニウム合金ピンと各種被膜の摩擦係数

CrN膜の摩擦係数は0.6前後で高く、TiAlN膜の摩擦係数はそれより高く0.7前後を示した。これに対して、TiC膜はCrN膜と同等もしくは若干小さい摩擦係数を示した。従来の硬質膜はいずれの膜においても、ピンオンディスク試験後の膜表面に図5(c)の例に示す様にピン材質であるアルミニウムの凝着が観察され、結果として、摩擦係数が高い結果となった。これらに対して、Ti-DLCおよびSi-DLC膜は摩擦係数が0.2~0.5と小さく、しゅう動試験後の膜表面にもアルミニウムの凝着がほとんど観察されなかった。(図5(d))

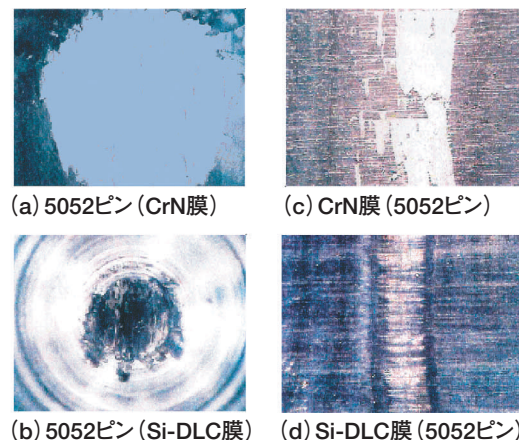


図5.5052 しゅう動試験後のピンおよびディスク

このように、Me-DLC膜はアルミニウム合金の耐溶着性という観点で非常に優れた特性を示すが、工具への適用に当たっては、基材に対する密着性が従来の硬質膜に対して劣るという欠点も有している。このため、実際の工具への適用に当たっては、DLC膜と基材との間に密着性を改善するための中間層を挟み込むことが必要となる⁷⁾。

耐溶着性改善を目的としたDLC膜の厚さは、非常に薄くDLC膜自身が硬くてもろいため、工具の刃先では、切削の初期段階でDLC膜が摩耗して中間層が一部露呈することになる。このため、実際の工具刃先は中間層により保護されることとなり、中間層には耐摩耗性に優れると同時に、アルミニウム合金の溶着に関してもある程度の効果を発揮することが要求される。

従来の硬質膜のなかでTiC系膜は、比較的摩擦係数が小さく、特に高Si含有アルミニウム合金(ADC12, AC4A)に対する耐摩耗性が優れている。これはTiC系膜の高い膜硬度(3,000HV)によることからDLC膜への親和性も他の膜に比してよい。実際の超硬チップを用いた旋削試験の結果でも、TiC系膜とSi-DLC膜の組合せが最もアルミニウム溶着量が少なく、切削抵抗が小さかった。

図6は刃先の初期摩耗状態の模式図である。表面の凸部のDLC膜(破線部)は切削の初期で一部摩耗するが、凹部には前述のピンオンディスク試験後のしゅう動面〔図5(d)〕に観察されるように、DLC膜(黒色部)が残って固体潤滑剤の役割を果たしている。

また、中間層のTiC系膜はその優れた耐摩耗性により、工具刃先の摩耗損失を防ぐとともに、それ自身が、ある程度アルミニウム合金の溶着を低減する役割を担う。

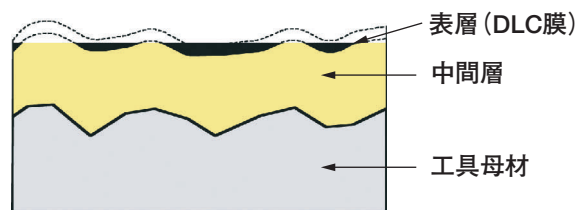


図6.切削初期における刃先損傷状態の模式図

(DLCドリルの切削事例)

図7と図8は、アルミニウム合金鋳物をDLCドリルφ5.5でドライ加工したときの超硬無処理ドリルとの比較結果の一例である。

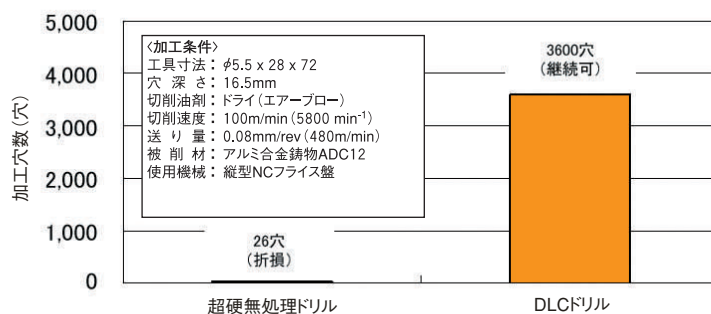
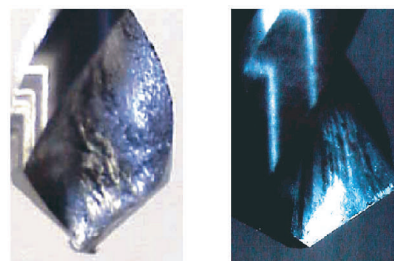


図7.ADC 12 のドリル切削試験結果

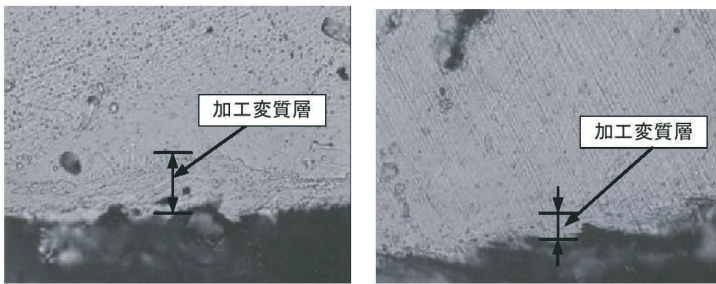
加工条件は、切削速度:100m/min(5,800min⁻¹)、送り量:0.08mm/rev(480mm/min)、穴深さ16.5mm(L/D=3)、止まり穴として切削試験を行った。超硬無処理ドリルでは、溝面の凝着が大きく、切りくず詰まりによりわずかに26穴で折損したが、DLCドリルでは、凝着がほとんど発生せず、3,600穴以上の安定した加工が可能であった。



(a)超硬無処理ドリル 26穴折損時 溝凝着大
(b) DLCドリル 3000穴加工後 凝着軽微

図8.ADC 12 を加工した後のドリル刃先の状態

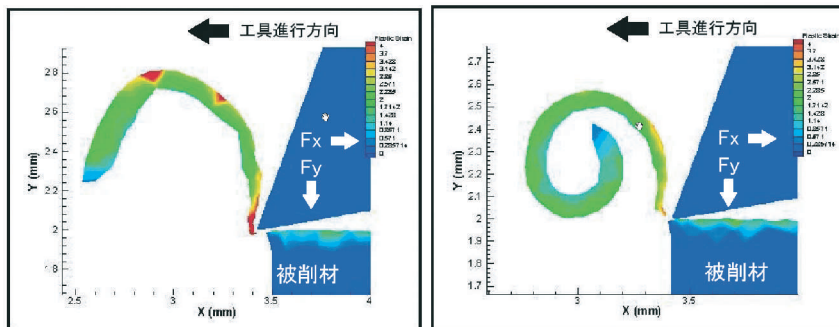
図9は、アルミニウム圧延板(5052)を切削した際に得られた切りくずのすくい面側断面の観察例である。DLCドリルで得られた切りくずに比較して超硬無処理ドリルでの切りくずは加工変質層が厚く、切りくず厚さも厚い。



(a)超硬無処理ドリル (b) DLCドリル

図9.5052 切削後の切り屑(すくい面側)

図10は、有限要素法を用いて切りくずの組成ひずみをシミュレーションした結果である。工具形状および切削条件は図8で用いたドリルとほぼ同一とし、表面の摩擦係数のみを超硬無処理： $\mu=0.5$ 、DLC： $\mu=0.1$ と仮定して計算した。超硬無処理[図10(a)]と比較してDLCを被覆した場合[図10(b)]は、切りくずの厚さが薄く、組成ひずみの値が大きい領域(すくい面側の色の濃い部分)も少ない。また、DLCを被覆した場合は切りくずのカール径が小さく、切りくず離れが良好であることがわかる。



(a) 超硬無処理ドリル ($\mu=0.5$) (b) DLCドリル ($\mu=0.1$)

図10.フライス切削シミュレーションによる組成ひずみの計算結果

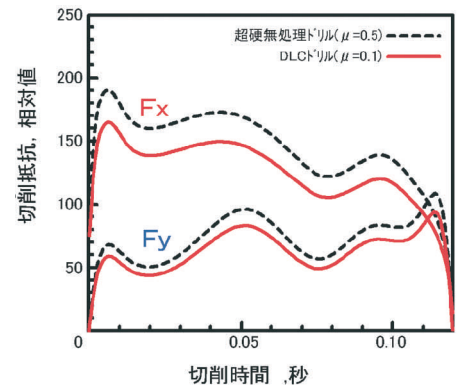


図11.フライス切削シミュレーションによる切削抵抗の計算結果

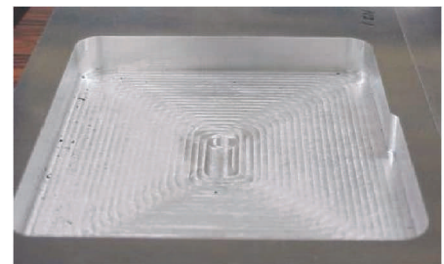
図11は、数値計算により得られた切削抵抗の推移である。DLCドリルの切削抵抗(図中破線)は超硬無処理ドリル(図中実線)よりも小さく切削抵抗の変動も少ない。すなわち、同様の加工をする場合の切削動力が少なくすむことを意味しており、DLCコーティングは「ドライ加工」による省エネルギーだけでなく、切削動力も低減可能であることを示している。

(DLCエンドミルの切削事例)

図12は、圧延アルミニウム合金(5052)を $\phi 10\text{mm}$ の2枚刃エンドミルで「ドライ加工」したときの、DLCエンドミルと超硬無処理エンドミルのワーク加工状態の比較結果の一例である。加工条件は、切削速度：628m/min、送り量：0.05mm/tooth、切込み：A a=15mm、Ar=2.5mmで切削を行なった。超硬無処理エンドミル[図12(a)]では、切削開始直後にエンドミルに被削材が溶着し折損したのに対して、DLCエンドミルでは、[図12(b)]の加工を2枚行うことができた。



(a)超硬無処理エンドミルで加工したワーク



(b) DLCエンドミルで加工したワーク



(c) DLCエンドミル

図12.エンドミルによる5052「ドライ加工」結果

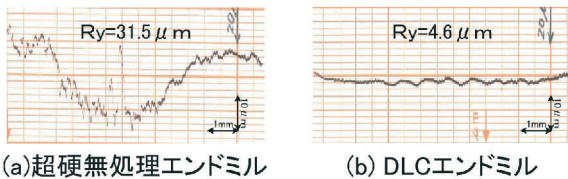


図13.ワーク仕上げ面粗さ測定結果

また、図13は、加工後のワーク仕上げ面の面粗さを測定した結果である。超硬無処理エンドミルに比べ、DLCエンドミルによる仕上げ面粗さは1/6と非常に小さい値を示した。これは、DLCコーティングにより工具刃先へのアルミニウムの溶着が低減されて、構成刃先の生成離脱が軽減されたためであると推定される。この事例から、DLCコーティングがアルミニウム合金の切削に対して、「ドライ加工」の実現や切削抵抗の低減による省エネルギーだけでなく、切削精度の向上も実現が可能であることがわかる。

3. まとめ

アルミニウム合金の「ドライ加工」を実現するためのコーティング膜の開発について、コーティング膜の機能と、実際の切削事例を紹介した。DLC膜に代表される^{※9}トライボマテリアルのコーティングは、従来実現が困難であった切削加工を実現させるだけではなく、切削エネルギーの低減、加工精度の向上など数多くの効果を引き出すことが可能である。しかしながら、このような効果を引き出すために必要なコーティング膜の機能や構成については、今なお不明な点が多い。実際に、切削して初めてその効果が確認されることがほとんどである。とくにドライ加工という観点では、切削点での温度や雰囲気中で被膜が目的材料に対してどのようなトライボロジー特性を示すのかを明らかにしていく必要があり、さまざまな条件下でのトライボマテリアルのデータの蓄積が必要となる。

用語解説

- ※1 「ドライ加工」
切削油を全く使用しない加工法で、環境負荷の低減以外にも高効率加工、省エネルギーの観点から注目されている。
- ※2 有害物質
従来、不水溶性切削油には、塩素化パラフィンが使用されている。この塩素化パラフィンには一部発癌性の疑いがあるとされている。
- ※3 DLC (Diamond Like Carbon) 膜
ダイヤモンドのような炭素膜で、摩擦特性、電気特性、耐食性などの性質がダイヤモンドに似ている。色調は黒色。
- ※4 Me-DLC膜
DLC膜中に炭化物生成金属をドーブすることによって内部応力を緩和したDLC膜の一種で、厚くて強固な膜を生成させることができる。
- ※5 アモルファスDLC膜
水素を含有しない/量が少ないDLC膜を指し、ダイヤモンド結合(sp³)が主体となるため、非常に硬い。
- ※6 ピンオンディスク試験
回転するディスク試験片に、ピン試験片を押しつけてすべり摩擦させ、摩擦係数、損傷状態を評価する試験。
- ※7 擬着
固体同士の接触面で、お互いの表面の原子が及ぼし合う結合力により固体同士がくっつく現象のこと。
- ※8 親和性
原子、分子の持つ電気的なプラスとマイナスの吸引力や、分子同士の引力に基づく力の事。
- ※9 トライボマテリアル
相対運動下で相互作用を及ぼしあう表面において何らかの機能を持つ材料の事。

参考文献

- 1) 幸田 成堂:工作機械のトライボロジーと環境対策,トライボロジスト, 46, 7 (2001) 542.
- 2) 近藤 猛男:トヨタ自動車におけるECO加工技術への取り組み, 第27回工作機械関連技術者会議, A2-2 (1997).
- 3) 大竹 尚登:材料のトライボロジーと環境対策,トライボロジスト, 46, 7 (2001)534.
- 4) 高井 治:DLC, ニューダイヤモンド,16, 4 (2000)15.
- 5) 熊谷 泰:DLC応用技術の展開, ニューダイヤモンド,16, 4 (2000)66.
- 6) 熊谷 泰:DLC:ダイヤモンド炭素, ニューダイヤモンド,16, 1 (2000)33.
- 7) A.Erdemiret al:Synthesis of superlow-friction carbon films from highly hydrogenated methane plasmas, Surface and Coating Technology, 133-134, (2000) 448.
- 8) A.Erdemir:Friction and wear performance of diamond-like carbon films grown in various source gas plasmas, Surface and Coating Technology, 120-121, (1999)589.
- 9) R.Gilmore, R.Hauert:Comparative study of the tribological moisture sensitivity of Si-free and Si-containing diamond-like carbon films, Surface and Coating Technology, 133-134, (2000) 437.
- 10) Yilmaz Özmen et al:The effect of humidity on the tribological behavior of diamond-like carbon(DLC) film coated on WC-Co by physical vapor deposition method, Surface and Coating Technology, 133-134, (2000)455.
- 11) M.P. Delplancke-Ogletree et al: Wear behavior of diamond-like carbon/metal carbide multilayers, Surface and Coating Technology, 108-109, (1998)484.
- 12) M.Stüber et al:Graded layer design for stress-reduced and strongly adherent superhard amorphous carbon films, Surface and Coating Technology, 116-119, (1999) 591.
- 13) S.J.Harris et al:Effects of load on the abrasion of steel by metal-containing diamond-like carbon, Surface and Coating Technology, 120-121, (1999)561.
- 14) K.Lee et al:Design of W buffer layer for adhesion improvement of DLC films on steels, Thin Solid Films, 377-378, (2000) 261.
- 15) 堀 功:プロセス・トライボロジー分科会, 第93回研究会「DLCコーティングの工具への適用」発表原稿

本 社	本社・富山事業所 東京本社	富山市不二越本町1-1-1 東京都港区東新橋1-9-2 汐留住友ビル17F http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/	〒930-8511 〒105-0021	Tel.076-423-5111 Tel.03-5568-5111	Fax.076-493-5211 Fax.03-5568-5206	
生産拠点	富山事業所	富山市不二越本町1-1-1	〒930-8511	工具 マシナリー ロボット ベアリング	Tel.076-423-5100 Tel.076-423-5140 Tel.076-423-5135 Tel.076-423-5120	Fax.076-493-5221 Fax.076-493-5242 Fax.076-493-5251 Fax.076-493-5231
	東富山事業所	富山市米田町3-1-1	〒931-8511	マテリアル 油圧機器	Tel.076-438-4411 Tel.076-438-8970	Fax.076-438-6313 Fax.076-438-8978
	滑川事業所	富山県滑川市大掛176	〒936-0802	プレジジョン カーハイドロリクス クリーンサーモ コーティング 精密成形	Tel.076-471-2101 Tel.076-471-2320 Tel.076-471-2981 Tel.076-471-2985 Tel.076-471-2991	Fax.076-471-2630 Fax.076-471-2324 Fax.076-471-2987 Fax.076-471-2989 Fax.076-471-2992
	水橋事業所	富山市水橋伊勢屋193	〒939-3524	ベアリング	Tel.076-478-2098	Fax.076-479-1081
営業拠点	東日本支社 北関東支店 北海道営業所 東北営業所	東京都港区東新橋1-9-2 汐留住友ビル17F 群馬県太田市下浜田町1087-7 札幌市東区本町1条10-4-10 福島県郡山市桑野2-33-1 ワン・ブリッジビル2F	〒105-0021 〒373-0821 〒065-0041 〒963-8025	Tel.03-5568-5280 Tel.0276-46-7511 Tel.011-782-0006 Tel.024-991-4511	Fax.03-5568-5290 Fax.0276-46-4599 Fax.011-782-0033 Fax.024-935-1450	
	中日本支社 東海支店 北陸支店	名古屋市名東区高社2-120-3 ナチ名古屋ビル 浜松市砂山町353-3 大協土地ビル7F 富山市石金2-3-60 ナチ北陸ビル	〒465-0095 〒430-0926 〒930-0966	Tel.052-769-6811 Tel.053-454-4160 Tel.076-425-8013	Fax.052-769-6830 Fax.053-454-4845 Fax.076-493-5215	
	西日本支社 中国四国支店 広島営業部 九州支店	東大阪市本庄西2-73-14 ナチ大阪ビル 岡山市西古松2-2-30 広島市安佐南区西原8-25-10 福岡市博多区山王1-10-30	〒578-8522 〒700-0927 〒731-0113 〒812-0015	Tel.06-6748-2510 Tel.086-244-0002 Tel.082-832-5111 Tel.092-441-2505	Fax.06-6748-1955 Fax.086-243-4346 Fax.082-832-5114 Fax.092-471-6600	
海 外	国際営業部	東京都港区東新橋1-9-2 汐留住友ビル17F	〒105-0021		Tel.03-5568-5240 Fax.03-5568-5236	
生産拠点 Overseas Manufacturing Companies	AMERICA	Indiana, Michigan / U.S.A. BRASIL				
	EUROPE	SPAIN CZECH				
	ASIA and OCEANIA	SINGAPORE THAILAND TAIWAN KOREA CHINA				
営業拠点 Overseas Sales Companies	AMERICA	U.S.A. CANADA MEXICO				
	EUROPE	GERMANY SPAIN U.K. ITALY				
	ASIA and OCEANIA	SINGAPORE VIETNAM MALAYSIA INDONESIA PHILIPPINES CHINA TAIWAN THAILAND KOREA AUSTRALIA				