

NACHI-BUSINESS

Machining news

Vol. **5** A1
November/2004

マシニング事業

プレジジョン

■ 寄稿・論文・報文・解説

近未来技術展望

「工具屋から見た超精密加工」

Perspective on the Near Future Technology---
Cutting Tool Researcher's View
on Ultra-precision Machining

〈キーワード〉 超精密加工・延性モード切削・工具機上再生
マイクロマシニング・ダメージフリー加工

東京大学 生産技術研究所 教授

谷 泰弘

By Prof.Dr.Yasuhiro Tani, Institute of Industrial Science of the University of Tokyo



要 旨

超精密加工は実用化という新しいフェーズに突入している。このフェーズでは加工機械の高剛性・高精度化とともに、工具に新しい機能を付加することが求められている。

本稿では、現在、超精密加工において注目されている延性モード切削^{※1}、マイクロマシニング^{※2}、ダメージフリー加工^{※3}の3つの加工技術に関して、工具として考えなければならない点および問題点を克服するための方策について解説する。

Abstract

Ultra-precision machining has entered a new phase called practical application that requires the addition of new functions to tools as well as highly rigid and highly precise machining. Currently, three machining technologies, ductile-mode-cutting, micro-machining and damage-free machining are drawing attention in the ultra-precision machining industry. In this paper, some considerations for applicable tools and the measures to solve problems are explained in relation to these machining technologies.

1. 超精密加工の 伸び悩み打開策

20世紀の終わり頃に「10年後、20年後の生産技術はどうなるだろうか」とか言うアンケートが盛んに行なわれ、いろいろな場所で結果が報告されていた。未来予測は目標と夢を与えてくれる。それに呼応したわけではないが、15年近く前に、これからの超精密加工は、

- ① 現状よりも高精度の加工
- ② 大型部品の加工
- ③ 硬質材料の加工
- ④ 微細三次元形状の加工

の4つの方面に展開されるだろうと、ある雑誌に書かせて頂いた¹⁾。この頃、超精密加工に関連して騒がれていた項目として、すでに非球面加工や鉄系材料の加工も存在していた。非球面加工は①と④の重ね合わせのような分野であり、鉄系材料の加工は③に類する難削材の加工になる。

書いたことには責任がある。幸いなことにだいたいの方向性としては間違っていないが、超精密切削に限って言えば、伸び悩んでいるという気がするのは著者だけだろうか。もし伸び悩みが事実だとすれば、その原因を作った犯人がいる。

一般に加工に与える影響は機械が3、工具が7。工作物に近い位置にいる工具の影響度がどうしても大きくなる。これを信じると、工具屋が犯人である可能性が高くなる。確かに工具屋の努力が足りないのかもしれないが、自称工具屋の著者が「工具屋も悪あがきはしているんだ」ということを本稿で示したい。

2. 延性モード切削

(延性モード切削とは)

1980年代に延性モード切削という言葉が流行した。これはシリコンやガラスなどの脆性材料を、鉄などの延性材料と同じように、流れ型の切りくずを出しながらクラックフリーで切削しようというものである。ここで注意しなければいけないことは、クラックフリー＝ダメージフリーではないということである。そのことは、通常の鉄系材料の正常な延性切削で加工歪が残留していることから伺える。

延性モード切削は、直径が数mなどという天体望遠鏡の大口径光学部品などの加工において、研削後の粗面を鏡面化し、後工程の研磨の取り代を減らす有効な手段として注目されていた。延性モード切削を行なうには、Dc値(図1)と言われるCritical Depth以下の、切れ刃切込み深さで切削を行なう必要がある。Dc値は工具形状や加工条件、被削材の種類等で異なるが、大体 $0.1\mu\text{m}$ 程度である。しかし、この値はポリシング面を単刃で切込みを変化させて加工して求められたものであり、研削面やラップ面などの粗面となるとマイクロクラックや加工歪が残留するため、もっと小さくなる可能性がある。そこで、50nm程度のNRRO(非同期成分の回転誤差, 図2参照)がある超精密工作機械でも、なかなか厳しい話となる。

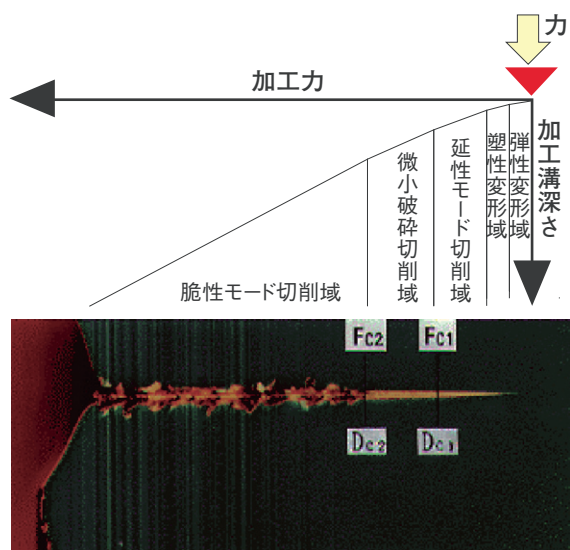


図1. Dc値 (Critical Depth)

(延性モード切削のための負圧浮上工具)

運動誤差(振動)があっても延性モード切削を安定的に実現できないものかと考え、図3の負圧浮上工具なるものを開発した^{※5}。これは磁気ディスクドライブの負圧浮上ヘッドにヒントを得たもので、その原理を流用している。この負圧浮上工具は、対向する工作物に追従して常に安定に工具と工作物との隙間を一定に維持してくれる優れたもの、たとえば、数 μm の面ぶれがあるような工作物に対しても、安定に $0.1\mu\text{m}$ 以下の隙間を保つことができる。非常に気に入っていて名刺の背景の図として使っている。

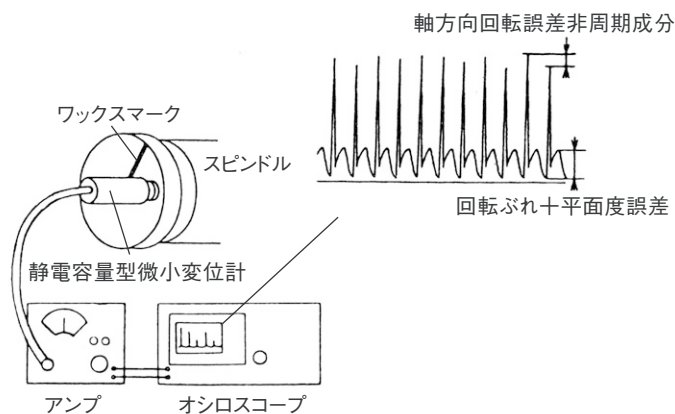


図2. 回転誤差非同期成分の測定

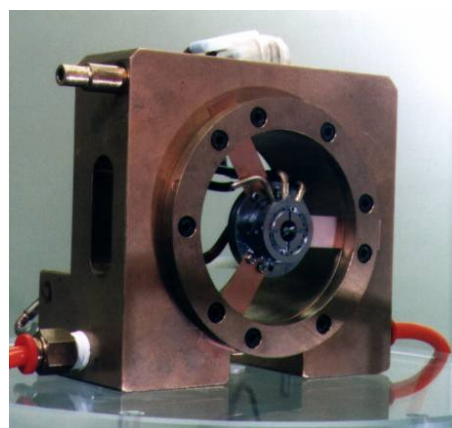


図3. 負圧浮上工具

図4のように、工具の中央に針状のダイヤモンド工具が取り付けられており、その周りには真空吸引するための穴がある。この穴に対して、リング状の溝とつながる溝が4方向から掘られている。リング状の溝には背面より切削液が供給され、中央の負圧により、これらの溝を埋めて切削液が中央の穴に向かって流れる。切削液の存在により、静圧が発生し、これが中央の負圧とバランスして、対向する工作物に対して、工具を一定の高さに保ってくれる。この円筒状の浮上工具部は、工具台に3本の板ばねで支持され、回転しないようにしてある。

(世界初の延性モード切削)

磁気ディスクドライブの負圧浮上ヘッドと異なる点は、この工具の場合、真空吸引により能動的に負圧を作っていることで、これは切りくずを中央の穴から吸引し除去すると言う作用も行なっている。このことにより、

切りくずに影響されず、安定に切削を行なうことが可能になる。この負圧浮上工具を用いて、図5のように世界で初めて、ガラスやシリコンの粗面の延性モード切削を可能にした。また、この加工法は圧力転写方式の切削加工を初めて提案したものであり、そういう意味でも興味深い。ただそのために、基本的には前加工面にならった加工になってしまう。しかし、この加工工程で形状精度を出すことを目的とせず、研削面などの粗面を鏡面化するのみという目的であれば、十分その役割を果たすことができる。

ただ残念なことにガラスやシリコンなどの硬質材料の加工では、最も硬くて摩耗しにくい^{※6}ピッカーズインデント形状のダイヤモンド工具であっても、図6のように容易にアブレイシブ^{※7}摩耗が生じて切削距離が伸びない。そのため、延性モード切削は盛んに研究が行なわれたが、未だ実用化されていない。

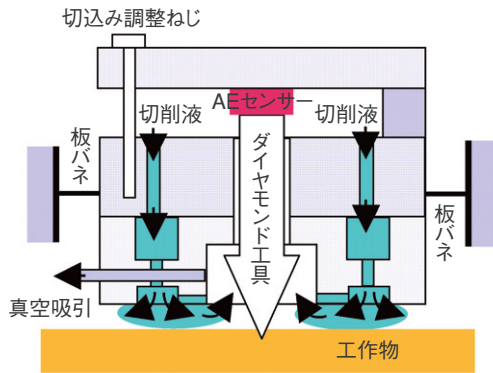


図4. 負圧浮上工具の構造

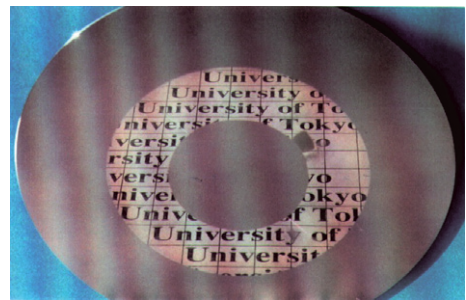
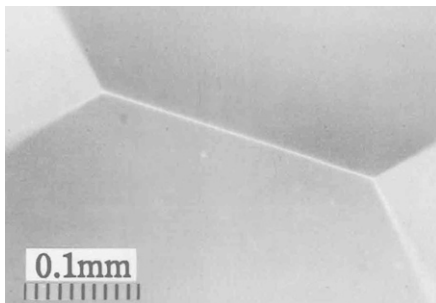
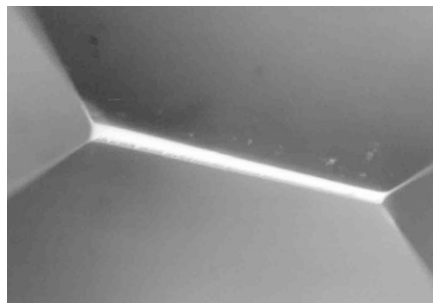


図5. 延性モード切削されたシリコンウェーハの粗面



(a) 加工前



(b) 加工後

図6. ダイヤモンド工具の摩耗

3. マイクロマシニング

(小径の工具を精度よく取り付けるには)

微細な3次元形状を持つ金型や小径の穴加工のために、マイクロマシニングの需要が着実に増えている。こういう需要に関連して、導光板金型用ブリズム溝加工機³⁾や自由曲面加工機⁴⁾などの開発が行なわれている。これらの機械では、従来と同様の工具が用いられているので問題とはならないが、一般にマイクロマシニングを行なおうとすると、どうしても工具は小径のものになる。小径の工具は摩耗しやすい。摩耗した工具は交換しなければいけない。しかし、小径の工具を精度よく取り付けることは難しい。プリント配線板の穴あけ等に用いられているマイクロドリルなどは工具には全く欠陥がないのに、取り付けが悪いために折損してしまうことも多いという。精度よく取り付けした小径工具は取り外したくないのが人情。

※8 (機上再生という新たな概念)

そこで、提案したのが機上再生という概念。図7のように工具の母材の表面に切削工具の場合は硬質層、研削工具の場合は砥粒層を形成する。加工によってその形成した層が摩耗すれば、摩耗が母材(合金)に達する前に剥離して再形成する。摩耗した部分のみを埋めるという考え方もあるが、修正して形状を出すのは結構難しく、また摩耗した表面には残留歪や拡散物質があるため、大部分を剥離して元の母材に近い形状に戻した方が密着性と再生精度があがる。

著者らはこの概念を電着と電解剥離により実現してみせた⁵⁾。その研究成果をもとに、図8のような回転工具用の機上再生装置をバッテリーケースを利用して試作した。この機上再生装置は、硫酸による硬質層の電解剥離、膜の密着性をあげるためのアルカリによるアノード電解とストライクめっき、そして洗

浄と複合めっきの五槽と予備槽から成り立っている。この装置を用いれば、約3分で工具の再生を行なうことができる。

この機上再生装置で形成した硬質層で、中～重切削を行なうと、現状ではそれほど切削距離が伸びないが、今後、膜の特性を改善して再生までの寿命を伸ばしていきたいと考えている。また、様々な加工形態に対応するために、将来的には金属層のみでなく、この硬質層として無機質層や有機質層も念頭において研究を続けている。それが実現すれば機上で粗切削から研削、固定砥粒研磨に近い状態まで同じ工具で加工できるかもしれない。夢は広がる。

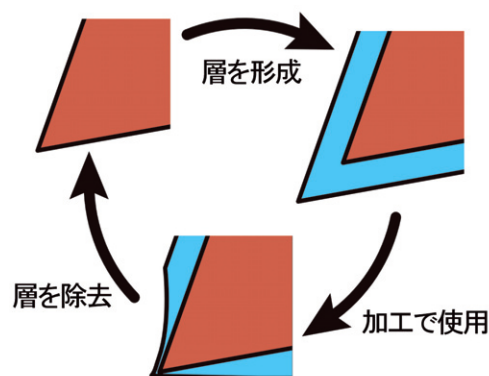


図7. 工具の機上再生

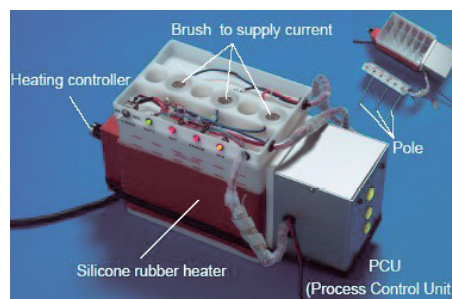


図8. 工具機上再生装置

4. ダメージフリー加工

(ダメージフリーの加工面を得るには)

延性モード切削の話でこれはクラックフリーであってもダメージフリーではないと申し上げた。機械的な加工を行なえば、加工歪が残留するのは道理。しかし、光学部品や半導体関係の部品の超精密研削では、ダメージフリーの加工面を得たいという無茶な要望が強い。ダメージを残さない加工を行なうためには、何らかの化学的作用を付加するしかない。まずは、砥石は現状のままで、研削液で何とかできないかという試みが行なわれている。この場合、腐食性の高い酸やアルカリの研削液を用いることになる。そのため、加工機械へのダメージ、砥石の劣化、機械的作用とのバランスに注意しなければいけない。あまり加工のマージンは広くない。

(砥石に化学的作用を持たせるには)

そうすると、砥石にそういう化学的作用を持たせられないかという話になる。砥石の3要素は砥粒、結合剤、気孔と言われるが、実際には^{※9}フィラーという第4の要素が含まれている。したがって、砥石に化学的作用を付加しようという話になると、工作物と反応するような砥粒を用いるか、反応する物質をフィラーとして用いるかという話になる。砥粒としてはシリコンと反応するシリカ⁹⁷⁾、ガラスと反応するセリアがよく知られている。シリコンに対しては炭酸塩も知られているが、コンタミネーションの関係でシリカが好まれている。セリアは湿式状態でメカノケミカル的な反応を生じるが、シリカは乾式状態での除去作用が湿式状態より2桁以上高速の反応を示す。完全に乾式状態の加工では、工作物を異常に昇温させ、熱的なダメージ

が気になる。そのため、加工域のみをいかに乾式に近い状態に保つかが焦点となる⁹⁾。

こうした化学的作用を生じる砥粒を用いた砥石は、肉を切らせて骨をたつ的な除去作用となり、研削比の低い加工となるため、いかに砥石形状を維持させるかが問題となる。

(マイクロカプセル砥石の効果)

化学的作用を生じるフィラーとしては鉄系に対する食塩がよく知られているが、食塩をシリコンの加工に用いるにはコンタミネーションの関係で抵抗がある。金属に関しては^{※10}ハロゲン化銻物も効果的であることが知られているが、ハロゲン化銻物では相当の高温にならないとその反応が期待できない。そこで、液体状態のハロゲン化銻物を用いることにした。図9のようにその液体をマイクロカプセル化し、砥石の中に含有させれば使用できるようになる。

用いたのは、PFPE (パーフルオロポリエーテル) オイル。このオイル100%ではマイクロカプセルの壁物質のメラミン樹脂が溶解したため、同種のPFC (パーフルオロカーボン) オイルで10倍希釈してマイクロカプセル化した。図10はアルミニウムとシリコンに対して、このマイクロカプセル砥石の効果を示したものである。PFCオイルのみのマイクロカプセルを使用した時の結果を比較して示している。PFCオイルでも若干の効果は観察されているが、PFPEオイルの効果が一番と優れていることが分かる。この砥石を用いれば、アルミニウムやシリコンに対して目づまりなく、高能率に仕上げ加工を行なうことが可能になる⁹⁾。

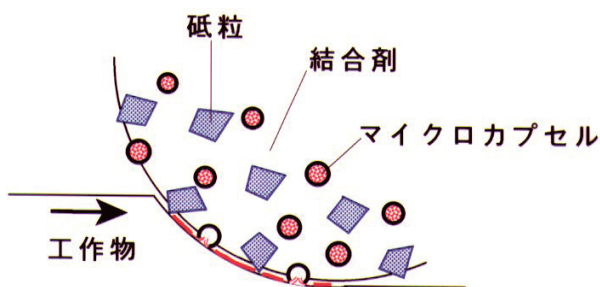


図9. マイクロカプセル砥石の作用

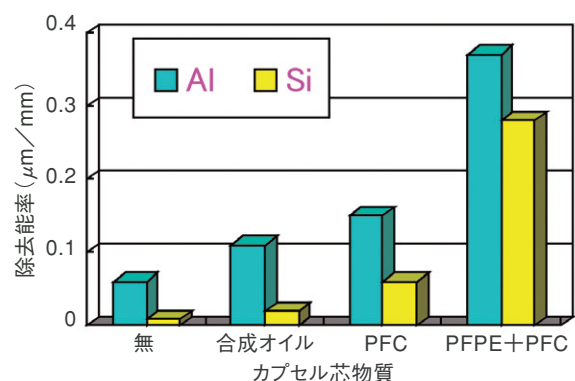


図10. マイクロカプセル砥石の効果

5. おわりに

超精密加工は研究者の手を離れ、新しいフェーズに入っている。実用化というフェーズでは、高剛性で高精度の加工機械をいかに安価に作るかということも重要であるが、それと同時に無視できないのが工具である。工具は工作物に近い位置にいるため、より加工特性への影響が大きい。延性モード切削で高硬度材料を切削できる工具、マイクロマシニングで小径でも寿命の長い工具、ダメージフリー加工を行なうために化学的作用を期待できる工具など、これまでの工具に対してさらにレベルアップした工具が求められている。

加工機械は工具を選び、工具は加工機械を選ぶ。今後、加工機械屋と工具屋が手を携えてこそ、付加価値の高い加工が可能になり、新しい飛躍が起こることだろう。

用語解説

- ※1 延性モード切削
ガラスやセラミックス、結晶材料などの脆性材料をクラックを発生させることなく金属切削のように延性破壊状態で切削する技術。微小切込み状態を維持することで実現できる。
- ※2 マイクロマシニング
微細形状の創成を行なう加工技術。切削加工のみでなく、放電加工や電解加工、アブレイシブジェット加工など種々の加工方法で行なわれる。切削の場合は微小径の工具が用いられる。
- ※3 ダメージフリー加工
工作物表面に加工ダメージを残さないような加工技術。化学的作用を付加することで実現できる。
- ※4 クラックフリー
マクロクラック、マイクロクラックともに生じないこと。とくに脆性材料の場合は工作物の強度低下につながる。
- ※5 負圧浮上工具
負圧で工作物に吸着しながら切削を行なう工具台。磁気ディスクドライブ装置の負圧浮上ヘッドに切削工具を取り付けたような形態になっている。
- ※6 ピッカースインデント
ピッカース硬度の測定のために用いられる圧子。ダイヤモンドで製作されており、先端の対面角が136°の四角錐となっている。最も摩擦しにくい形状だとされている。
- ※7 アブレイシブ摩擦
機械的な摩擦により生じる磨り減り摩擦。硬度の高い物質により削り取られて摩擦する。
- ※8 機上再生
工作機械上で工具の切れ味を再生する技術。これまでの工具の切れ味の再生技術としては工具研削が知られている。
- ※9 フィラー
砥石中に強度、潤滑性、吸熱性などの向上のために添加される物質。砥石の第4の要素である。フィラーの含まれていない砥石は皆無と言ってもいい。
- ※10 ハロゲン化鉱物
フッ素・塩素などのハロゲン元素と結合している鉱物。岩塩、蛍石、氷晶石、アタカマ石、ボレオ石などがある。ハロゲン化鉱物は、一般的には透明でガラス光沢があり、水に溶けるものもある。一般にこういうものが含まれる砥石は切れ味がよいとされる。

参考文献

- 1) 谷 泰弘:超精密切削加工技術—研究最前線—、マシニスト、34巻1号、1990年1月、p.52-55
- 2) 上村康幸・谷 泰弘・佐藤壽芳・山口ひとみ:
負圧浮上工具方式による硬脆材料の延性モード切削、日本機械学会論文
文集(C編)、63巻614号、1997年10月、p.3654-3659
- 3) http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/sei/kakouki/nano_a.htm
- 4) <http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/sei/kakouki/asp30a.htm>
- 5) 倉橋一豪・谷 泰弘・柳原 聖:
切削工具の機上再生技術に関する研究、日本機械学会論文集(C編)、
70巻690号、2004年2月、p.590—595
- 6) 谷 泰弘・佐伯達彦・左光大和・小林一雄・佐藤良幸:
超微細砥粒の電気泳動現象を利用したシリコンウェーハのインフィード研削、
日本機械学会論文集(C編)、64巻625号、1998年9月、p.3650-3654
- 7) 榎本俊之・斉藤克己・金澤孝明・谷 泰弘:
超極細シリカ凝集砥粒を用いた研磨フィルムによるシリコンウェーハのエッ
ジ仕上げ—高生産性研磨フィルムの開発—、砥粒加工学会誌、46巻9号、
2002年9月、p.38-43
- 8) 奥山哲雄・河津知之・加賀宗明・
斉田国広・村井史朗・谷 泰弘:
多段研削によるシリコンウェーハの高品位BG加工、2002年度精密工学
会秋季大会学術講演会論文集、2002年10月、p.132
- 9) 榎本俊之・島崎 裕・谷 泰弘・江藤 桂・
日暮久乃・山口幸男・酒井安昭:
マイクロカプセルを利用したラッピング砥石によるメカノケミカル研磨、日本
機械学会論文集(C編)、65巻632号、1999年4月、p.1698-1703

関連記事

- 1) 牧野 哲也:液晶ディスプレイ光学素子成型加工機「ナノグルーバ AMG92P」
NACHI-BUSINESS news Vol.2 B2、February/2004

本 社	本社・富山事業所	富山市不二越本町1-1-1	〒930-8511	Tel.076-423-5111	Fax.076-493-5211
	東京本社	東京都港区東新橋1-9-2 汐留住友ビル17F	〒105-0021	Tel.03-5568-5111	Fax.03-5568-5206
http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/					
生産拠点	富山事業所	富山市不二越本町1-1-1	〒930-8511	工具	Tel.076-423-5100 Fax.076-493-5221
				マシナリー	Tel.076-423-5140 Fax.076-493-5242
				ロボット	Tel.076-423-5135 Fax.076-493-5251
				ベアリング	Tel.076-423-5120 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	Tel.076-438-4411 Fax.076-438-6313	
			油圧機器	Tel.076-438-8970 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	Tel.076-471-2101 Fax.076-471-2630	
			カーハイドロリクス	Tel.076-471-2320 Fax.076-471-2324	
			クリーンサーモ	Tel.076-471-2981 Fax.076-471-2987	
			コーティング	Tel.076-471-2985 Fax.076-471-2989	
			精密成形	Tel.076-471-2991 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	東京都港区東新橋1-9-2 汐留住友ビル17F	〒105-0021	Tel.03-5568-5280	Fax.03-5568-5290
	北関東支店	群馬県太田市下浜田町1087-7	〒373-0821	Tel.0276-46-7511	Fax.0276-46-4599
	北海道営業所	札幌市東区本町1条10-4-10	〒065-0041	Tel.011-782-0006	Fax.011-782-0033
	東北営業所	福島県郡山市桑野2-33-1 ワン・ブリッジビル2F	〒963-8025	Tel.024-991-4511	Fax.024-935-1450
	中日本支社	名古屋市名東区高社2-120-3 ナチ名古屋ビル	〒465-0095	Tel.052-769-6811	Fax.052-769-6830
	東海支店	浜松市海老塚1-20-17	〒432-8033	Tel.053-454-4160	Fax.053-454-4845
	北陸支店	富山市石金2-3-60 ナチ北陸ビル	〒930-0966	Tel.076-425-8013	Fax.076-493-5215
	西日本支社	東大阪市本庄西2-73-14 ナチ大阪ビル	〒578-8522	Tel.06-6748-2510	Fax.06-6748-1955
	中国四国支店	岡山市西古松2-2-30	〒700-0927	Tel.086-244-0002	Fax.086-243-4346
	広島営業部	広島市安佐南区西原8-25-10	〒731-0113	Tel.082-832-5111	Fax.082-832-5114
九州支店	福岡市博多区山王1-10-30	〒812-0015	Tel.092-441-2505	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. BRAZIL			
	EUROPE	SPAIN CZECH			
		ASIA and OCEANIA KOREA TAIWAN CHINA THAILAND SINGAPORE			
営業拠点 Overseas Sales Companies	AMERICA	U.S.A. CANADA MEXICO BRAZIL			
	EUROPE	GERMANY SPAIN U.K. ITALY			
		ASIA and OCEANIA KOREA TAIWAN CHINA THAILAND SINGAPORE MALAYSIA INDONESIA PHILIPPINES VIETNAM AUSTRALIA			