

# NACHI-BUSINESS

Machining news

Vol. **8A2**  
August/2005

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

近未来技術展望

## 「研削の勧め」

Perspectives on Near-future Technologies  
"The Charms of Grinding"

〈キーワード〉 研削加工・砥粒・超砥粒・CBN砥粒・ダイヤモンド砥粒  
自生作用・超高速研削・超精密研削・WA砥粒

東北大学 名誉教授

庄司 克雄

By Prof.Dr.Engg.Katsuo Syoji, Professor Emeritus of Tohoku University

著者プロフィール

2004年3月に東北大学を退職するまでの約40年間、精密加工、特に研削加工を中心に教育、研究に従事した。著書に、研削加工学(養賢堂 2004.2)、超精密と非球面加工(監修 NTS 2004.7)などがある。また(社)砥粒加工学会会長、(社)精密工学会理事、(社)日本機械学会理事、精密加工研究会会長などを歴任。

## 要 旨

研削加工は、非常に優れた長所がありながら、とかく敬遠されがちである。それは、砥石の選択肢が多すぎることや、<sup>※1</sup>ドレッシングや<sup>※2</sup>ツルーイングなどの使用技術が難しいためである。超砥粒を用いた研削技術なども未完成である。しかし技術的に未完成であるということは、独自のノウハウによって、他の追随を許さない固有技術を獲得する可能性を秘めているということでもある。

NACHIでは研削加工が広く行なわれ、最先端の超精密研削加工機も製造されている。今後も、研削技術発展の牽引者として、業界をリードしていくことが期待される。

## Abstract

In spite of the excellent grinding benefits, grinding tends to be avoided for some reasons. It is because there are too many types of grinding wheels to choose and it is difficult to understand the dressing and truing technologies. In addition, the grinding technology with super abrasive grains has not been fully developed.

On the other hand, the fact that such technology is developing yet implies that it is possible with individual, unique know-how to develop a proprietary technology that cannot be emulated by others.

At Nachi, grinding is widely used and the cutting-edge super precision grinders are also manufactured. Nachi is expected to lead the industry in developing grinding technology as an industry driving force in the future, as well.

## 1. 機械加工における研削加工の位置づけ

研削加工は、いろいろな意味で切削加工と研磨加工の中間に位置づけられ、両翼にある切削加工と研磨加工が共有し得ない優れた特長を共有し、同時に研削加工固有の特長も兼ね備えている。近年、超砥粒の登場によって、研削加工の性能は飛躍的に向上し、加工能率の点では切削加工に、鏡面加工の点でも研磨加工に匹敵するほどになった。本稿では、このような観点から、研削加工の魅力を紹介したいと思う。

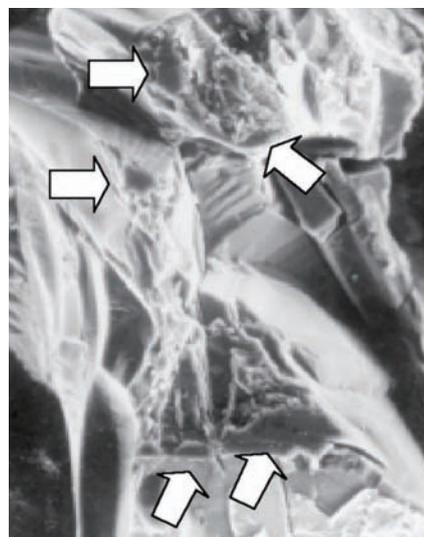


図1. WA60J7Vの砥粒切れ刃



## 2. 研削加工の魅力

### 1) 自生作用がある

砥粒切れ刃は、切削工具と異なり、微小破砕<sup>※4</sup>によって切れ味が再生するという特長を持つ。しかし自生作用は、どのような条件でも、起きるわけではなく、たとえばC系の砥粒では起きにくい。また同じ、WA砥粒<sup>※5</sup>でも、シリコンや石材など硬脆材料を研削したときには起きにくいことが知られている<sup>1)</sup>。また、いったん鈍化、もしくは平坦化した砥粒は、微小破砕を起こしにくい。

図1は、砥石WA60J7Vを単石ダイヤのドレッサでドレッシングしたときの砥粒のSEM写真である。矢印で示した箇所は砥石の最外周面で、非常に平坦な部分<sup>※7</sup>が形成されている。このようにA系の砥粒を単石ダイヤでドレッシングした場合には、平坦化した部分が生じやすいので、十分注意する必要がある。

ダイヤモンド砥粒、とくにブロッカータイプや、ごく微粒のダイヤモンド砥粒では、砥粒切れ刃の破砕による自生作用はほとんど期待できない。したがって、ダイヤモンド砥石の場合は、結合剤の破砕や破壊、あるいは接着剥離による砥粒の脱落に頼らざるを得ない。

### 2) 砥石の切れ味(研削性能)をコントロールできる

砥石が研削工具として非常に優れている点は、結合度を操作することによって、砥石の研削性能を自在にコントロールすることができることである。図2 (a)、(b)、(c)は、それぞれ結合度C、J、Pの3種の砥石作業面の電子顕微鏡写真である。結合度が低いほど切れ刃がシャープなのが分かる。研削では、“高硬度の難研削材には軟らかい(低結合度の)砥石、低硬度の易削材には硬い(高結合度の)砥石”というのが原則であるが、これはこのようなことに基づいている。

以上は、結合剤についてであるが、このほか、砥粒の粒度や砥粒率(すなわち“組織”)を操作することによっても、砥石の研削性能をコントロールできる。とくに砥粒の粒度は、仕上げ面の粗さに直接関係する重要な因子である。これらは、他の加工法にはない、研削加工に特有の性質である。したがって研削加工を適用する場合には、このような特性を十分活用すべきであろう。

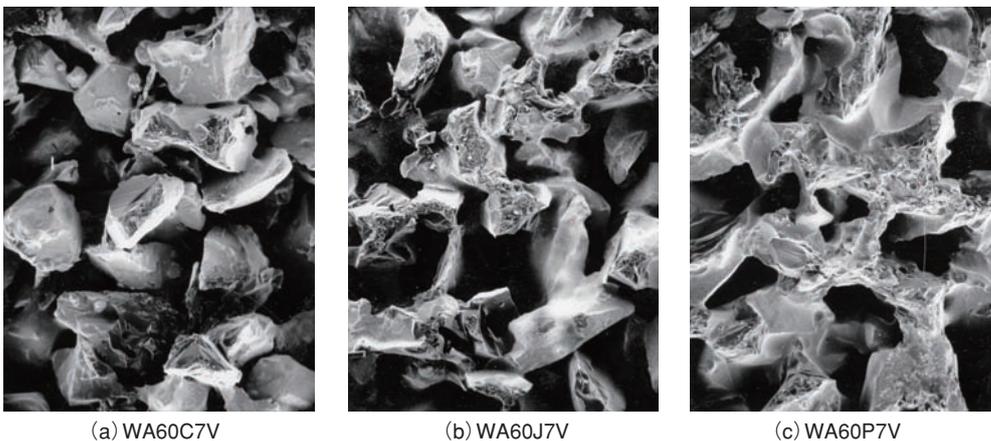


図2. 結合度の異なる砥石作業面の比較

### 3) 形直し、目直しが容易である

これも良く知られている研削加工の特性である。しかしあまりに常識化してしまっているために、かえって軽視されているように思われる。代表的な切削工具であるフライスでは、工作機械の回転軸に取り付けたとき、偏心があっても機上で外周を研削して振れを取ることができない。これは、フライスのそれぞれの刃先には、“逃げ”、すなわち二番があるからである。しかし砥石では、砥粒はダイヤモンドドレッサで“切削”されるのではなく破碎されるので、それぞれの砥粒切れ刃には自動的に“逃げ”が形成される。

この特性は、非常に精密な加工をしようとするときには、重要である。例えば、単結晶ダイヤモンドバイトを回転させて、いわゆるフライカットを行なう場合、複数本のバイトを同時に使用することはできない。これは複数本のバイトの刃丈を高精度に揃えることができないからである。これに対して研削加工は、高精度のツールイングさえ可能であれば、連続的な加工が可能である。

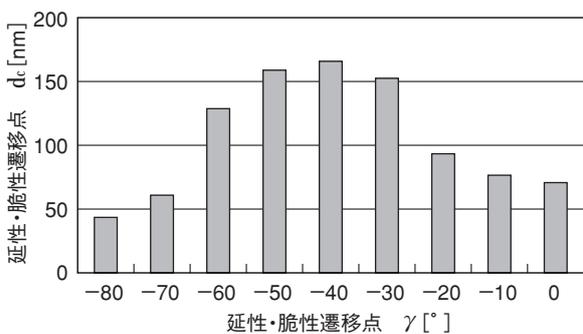


図3. 工具すくい角と延性・脆性遷移点

### 4) 切れ刃のすくい角が負である

金属の切削加工では、せん断変形によって流れ型の切りくずが形成されるが、単結晶シリコンのような脆性の大きな材料では、せん断変形する以前に引張り破壊するので、流れ型の切りくずは形成されない。しかし工具すくい角を負にして、切込量(正確には、切取り厚さ)を極めて小さくすると、単結晶シリコンであっても金属のようにせん断変形による切りくず形成が可能になる。すなわち、“延性モード”切削ができ、仕上げ面は鏡面になる。

このことは、以前から良く知られていた。そして、このように切削モードが脆性から延性へ変わるときの臨界切取り厚さ $d_c$ は、延性・脆性遷移点と呼ばれている。そこで筆者らは、工具すくい角と延性・脆性遷移点 $d_c$ との関係を求めた<sup>2,3)</sup>。図3は、その結果である。従来は、工具すくい角は負の方向で、大きければ大きいほど延性・脆性遷移点 $d_c$ が大きく、すなわち延性モード切削になりやすいと考えられていた。しかし、この結果から、 $-30^\circ \sim -60^\circ$ の範囲に最適値があり、それ以上になると、むしろ脆性モード切削になりやすいということがわかった。

砥粒切れ刃はシャープな状態で、すくい角がこの最適値の範囲にある。すなわち研削加工では、砥粒切れ刃はシャープな状態が維持されれば延性モード切削に適した状態にあり、砥粒切込み深さを延性・脆性遷移点 $d_c$ 以下にすることは極めて容易であるから、脆性の高い材料でも鏡面加工が可能であるということである。また硬脆材料の鏡面加工には、砥粒切れ刃の先端を丸めるよりも、シャープな状態にした方が有利であるということも、論理的に裏付けられた。

そして注意しなければならないことは、粒度の選択である。砥粒切込み深さが小さくなると、粒径の大きな砥粒では負のすくい角が大きくなり(図4参照)、延性モード切削の最適値の範囲を超えてしまう。したがって、微粒、もしくはごく微粒の砥粒を使用せざるを得ない。なお#3000や#4000というごく微粒砥石を用いた場合、果たして粗粒の場合と同様に、砥粒切れ刃による切削が行なわれるのかという心配もあろう。図5は、ダイヤモンド砥石SD8000によるジルコニアセラミックスを、平面ホーニング法で研削した面のAFM写真の例である。砥粒切れ刃による切削痕ははっきりと認められる。このように数十nm以下の切込み深さであっても、切れ刃がシャープに保たれているならば、上すべりなどせず切削が可能である。

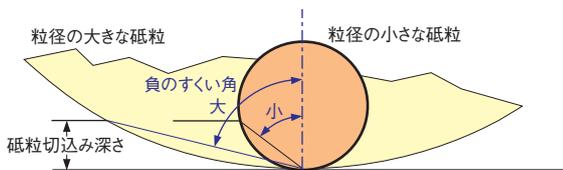


図4. 砥粒の粒径とすくい角

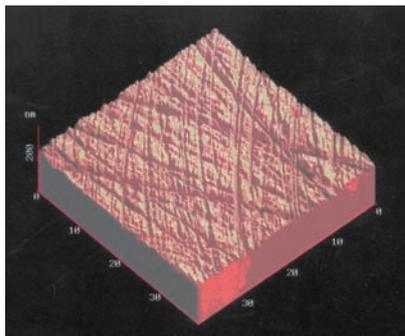


図5. ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石SD8000によるジルコニアセラミックス研削面のAFM写真

## 5) 工具剛性の操作が可能

平面と球面のような幾何学的に単純な面は例外であるが、通常の機械加工は、工具の運動軌跡を転写することによって行なわれる。図6は、その転写性<sup>※14</sup>をスケールにして、各種の加工法を、筆者の勝手な主観で並べたものである<sup>5)</sup>。形状精度の高い加工を達成しようとする場合には、基本的に工具軌跡の転写精度が高い加工法を選ぶべきであり、転写精度の高い加工法ほど、高精度の工作機械が不可欠となる。

一方、平滑な面をつくるという点では、逆に工具軌跡の転写性が悪い方が有利である。単結晶ダイヤモンドバイトによる超精密切削のように転写性が極めて高い加工法では、工作機械の微小な振動なども転写される。したがって表面粗さのオーダーで工具軌跡を保証する工作機械が要求されることになる。しかし、ポリッシングのように転写性の悪い加工では、工作物や工具が多少振動しても、それが加工面に転写されることはない。すなわち、工具軌跡の転写性に関して、加工精度と仕上げ面粗さは互いに背反の関係にある。しかし研削加工では、たとえばレジンボンド砥石を使うことによって転写性をわずかに犠牲にして、粗さを改善することができる。これは鏡面加工を行なう点では、非常に好都合である。

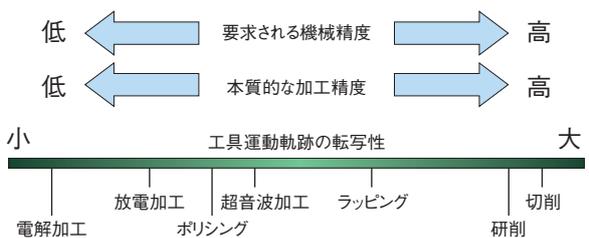


図6. 工具軌跡の転写性と加工精度

### 3. 超砥粒の効果

※15  
 ダイヤモンドとCBNという耐摩耗性の極めて高い砥粒の登場によって、研削加工の性能は飛躍的に向上した。その第1は、もちろん、通常砥石では研削不能であった高硬度材の研削が可能になったことである。とくに、超合金や半導体、セラミックなどはダイヤモンド砥石の登場によって、初めて目の目を見ることができたといっても過言ではないであろう。そしてさらに、耐摩耗性の極めて高いCBN砥石の使用によって、研削の自動化が容易になったことである。この効果は大きい。

第2は、金属コアの砥石が可能になり、切削加工に匹敵するような高能率研削が可能になった。図7は、ビトリファイドボンド砥石(CBN60N100CR01)を用いて行なったときの実験結果で、図の最上段の折れ線一番右の実験点は、砥石半径切込量  $\Delta = 10\text{mm}$ 、テーブル速度  $v = 6\text{m/min}$ で研削したときの結果である。

そして第3は、極めて微粒の砥粒が研削に使用可能になったということである。超仕上げでは、一般砥粒でも#500～#800程度の微粒の砥石が使用されている。しかし砥石周速の速い研削では、このような微粒の一般砥石は耐摩耗性が低いために、ほとんど使用できない。しかし耐摩耗性の極めて高いダイヤモンド砥粒の登場で、#1500～#3000のごく微粒、あるいは、それ以上の超微粒砥石も研削に使用できるようになった。これは、超精密研削を可能にしたという点で、非常に大きな効果である。このようなごく微粒のダイヤモンド砥石を研削に使用することによって、仕上げ面粗さの点でも、従来の研磨加工に対抗できるようになった。

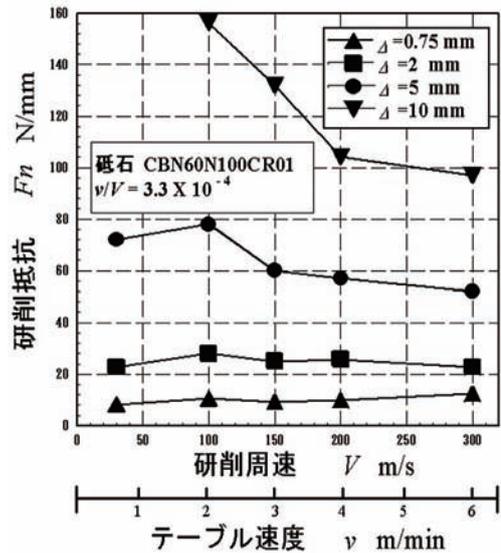


図7. 砥石周速と法線研削抵抗との関係

#### 参考文献

- 1) 松井正己・庄司克雄・田牧純一：  
単粒切削における砥粒切れ刃の摩耗について  
砥粒切れ刃の切削性能に関する研究—第1報 精密機械,42,5(1976)376
- 2) 間 紀旺・庄司克雄・鈴木浩文・厨川常元：  
ダイヤモンド平バイトを用いた単結晶Siの延性モード切削  
精密工学会誌 64,9(1998)1345.
- 3) 間 紀旺・庄司克雄・厨川常元：  
大きな負のすくい角工具による延性・ぜい性遷移  
精密工学会誌 66,7(1999)2000.
- 4) 司 克雄：平面ホーニング加工と技術課題  
機械と工具 36,6(1992)73.
- 5) 庄司克雄：研削・研磨の接点を考える  
機械と工具 38,8(1994)18.
- 6) 庄司克雄：研削加工学  
養賢堂 (2004).

## 4. 研削は“技術”であって“技能”ではない

研削加工は、このように非常に優れた長所がありながら、とかく敬遠されがちである。それは、砥石の選択肢が多すぎることで、ドレッシングやツルージングなど使用技術が難しいためであろう。とくに超砥粒砥石の場合は、そうである。これは、超砥粒を用いた研削技術とそれをとり巻く技術が未完成のためである。しかし、技術的に未完成であるということは、独自のノウハウを確立することによって、他の追随を許さない固有技術を会得する可能性が潜在するということでもある。

筆者は、これまで、研削加工に関する研究をすすめる中で、できるだけ研削を系統的に理解しようと努力してきたつもりである。その立場で、どうしてもやりきれないのは、まだ加工現場では、研削加工が“技能”

として捉えられていることである。筆者は、決して技能を否定したり、低く見たりするつもりはない。しかし、技能はあくまで個人の職人芸であって、研削が“職人芸”として捉えられている限り、進歩がない。

研削には、ある系統だった考えが存在する。もし系統化された考え方がなかったら、知識の積み重ねが困難である。その意味で研削は技能でなく“技術”であるということ、ぜひ認識して欲しいのである。なお研削加工の基本的な考え方については、与えられた紙数の関係で割愛した。拙著「研削加工学」<sup>6)</sup>を参考にして頂きたい。

これまでの筆者の経験をもとに、研削の魅力について述べた。加工現場に関係する方々に、少しでもお役に立てれば幸甚である。

### 用語解説 (文責:編集部)

#### ※1 ドレッシング

目立て、目つぶれを起こした砥石の表面を除去し、切れ味の低下した砥石の表面に新しく鋭い切刃を再生させる作業。また、無気孔砥石にあっては、砥粒の周りの結合剤を除去して、チップポケットを作ること。

#### ※2 ツルージング

砥石車の外周の砥粒と結合剤を除去して、砥石軸に対し同心にし、一定形状に整形すること。

#### ※3 超砥粒

アルミナなどに比べて硬度が高いCBNやダイヤモンドなどの砥粒の総称。

#### ※4 自生作用

砥粒は仕事(切粉を出す)を重ねる毎に磨耗が大きくなり、切削抵抗によって、ボンド(結合剤)の保持限界を超えた時に砥粒が脱落して、新しい砥粒(切れ刃)を出すこと。

#### ※5 C系の砥粒

黒鉛とコークスを高温で加熱して製造した六方晶系の炭化珪素(SiC)から成る黒色あるいは緑色の砥粒。

#### ※6 WA砥粒

白色アルミナ砥粒。高純度アルミナを主成分とするため透明で白色に見える。破砕性に富み、精密研磨に適している。

#### ※7 SEM写真

電子顕微鏡写真SEM(Scanning Electron Microscope:走査型電子顕微鏡)。

#### ※8 A系の砥粒

アルミナ質砥粒の総称。

#### ※9 ブロッキータイプ

砥粒形状が、角ばった形状のもの。

#### ※10 砥粒率

砥石全体に占める砥粒の体積比。

#### ※11 フライカット

工具を高速回転させ、鏡面を得る加工法。

#### ※12 臨界切り取り厚さ

超精密切削で、脆性モード切削から延性モード切削に移行するときの切り取り厚さ。

#### ※13 AFM

原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope)。試料と探針の間に働く原子間力を検出して試料表面を走査しながら表面形状を観察する。

#### ※14 転写性

複雑な形状の創成は、基本的に、工具の運動軌跡の正確な転写に行なわれる。

#### ※15 CBN

ダイヤモンドに次ぐ硬さを持つ物質で、主に鉄鋼材料の研削用砥石に用いられる。

<b>本 社</b>	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	〒930-8511 〒105-0021	Tel.076-423-5111 Tel.03-5568-5111	Fax.076-493-5211 Fax.03-5568-5206	
		URL : <a href="http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/">http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/</a> E-mail : <a href="mailto:webmaster@nachi-fujikoshi.co.jp">webmaster@nachi-fujikoshi.co.jp</a>				
<b>生産拠点</b>	富山事業所	富山市不二越本町1-1-1	〒930-8511	工具 マシンナリー 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
<b>営業拠点</b>	東日本支社 北海道営業所 東北営業所 北関東営業所	東京都港区東新橋1-9-2 汐留住友ビル17F 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 群馬県太田市浜町26-2	〒105-0021 〒065-0041 〒963-8025 〒373-0853	Tel.03-5568-5280 Tel.011-782-0006 Tel.024-991-4511 Tel.0276-46-7511	Fax.03-5568-5290 Fax.011-782-0033 Fax.024-935-1450 Fax.0276-46-4599	
	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 浜松市海老塚1-20-17 富山市石金2-3-60 ナチ北陸ビル	〒465-0095 〒432-8033 〒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	
<b>海 外</b>	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	
<b>生産拠点</b> Overseas Manufacturing Companies	AMERICA	Indiana, Michigan / U.S.A.	BRAZIL			
	EUROPE	SPAIN	CZECH			
	ASIA and OCEANIA	KOREA	TAIWAN	CHINA	THAILAND SINGAPORE	
<b>営業拠点</b> 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	