

## 超精密加工と高性能加速管への応用(1)

小泉 晋\*

## Ultra-precision Machining and its Application to Advanced Accelerators (1)

Susumu KOIZUMI\*

## 第1章 プロローグ

## 1. はじめに

筆者が、平成2年、筑波山の麓にある高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）において研究に従事した時は、最先端の技術を駆使した粒子加速装置を用いて、物質の根源に迫る研究を、国の威信をかけて日夜を問わず行っていた。また、その粒子加速装置に使用する加速管の性能をあげるための次世代高性能加速管（Xバンド加速管）の研究開発も行われていた。

Xバンド加速管は、最先端の加工技術である超精密加工法を用い、かつ、究極の界面接合の技術を開発しない限り実現不可能な極限の加速管である。そのために、超精密加工技術の1から研究開発を始め、ついには究極の界面接合にも成功して、次世代の加速管と云われているXバンド加速管の雛形の開発に成功した。（以下、高エネルギー加速器研究機構について、その当時の説明をした場合には、旧称の高エネルギー物理学研究所の名称そのままを使用しているので御了承願いたい。）

筆者は、かつて大手工作機械メーカーの東芝機械において、日本における超精密加工の黎明期（昭和50年代）から超精密工作機械の開発に従事していた事が縁で、当時の高エネルギー物理学研究所において、その超精密加工を応用した高性能次世代加速管（Xバンド加速管）の研究開発に従事させていただいた。

ところで、ここで述べた超精密加工とか界面接合とか云う専門語は、最近に出てきた言葉であり、皆様には馴染みの薄い用語であろうと推察されるし、このあたりの用語や加工法についての解説書もほとんど無

い。その様なことから、筆者が分かりやすい解説をお引き受けすることとなったのである。

したがって、本稿は、その最先端の超精密加工技術とはどのようなものであり、また、その様な技術をどのように高性能加速管などに応用したかと言う様なことを、平易に分かりやすく解説させていただいた加速器研究者のための超精密加工講座と云える。

## 2. 単 位

本論に入る前に、まず、使用する単位（図1）について再確認しておきたい。

1メートル（m）の1/1000は、1ミリ（mm）であり、1ミリの1/1000を1マイクロン（ $\mu\text{m}$ ）と云う。その1/1000、すなわち、 $10^{-9}\text{m}$ を1ナノメートル（nm）と呼び、その1桁下は、もはや原子間距離などに使用されるオングストローム（ $\text{\AA}$ ）である。

図1において、太字で表したマイクロン以下の単位が、超精密加工の本講座に使用する単位である。

超精密加工とは、このレベルの極微細寸法を使用し

メートル	1 m	= $10^0$ m	
		= $10^{-1}$ m	
センチメートル	1 cm	= $10^{-2}$ m	
ミリメートル	1 mm	= $10^{-3}$ m	
		= $10^{-4}$ m	
		= $10^{-5}$ m	
マイクロン	1 $\mu\text{m}$	= $10^{-6}$ m = 1	$\mu\text{m} = 1000$ nm
サブマイクロン		= $10^{-7}$ m = 0.1	$\mu\text{m} = 100$ nm
		= $10^{-8}$ m = 0.01	$\mu\text{m} = 10$ nm
ナノメートル	1 nm	= $10^{-9}$ m = 0.001	$\mu\text{m} = 1$ nm = 10 $\text{\AA}$
オングストローム	1 $\text{\AA}$	= $10^{-10}$ m = 0.0001	$\mu\text{m} = 0.1$ nm = 1 $\text{\AA}$

図1 長さの単位

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK  
High Energy Accelerator Research Organization

ている事を頭の片隅に置きながら以下の本文を御覧いただきたい。

また後述するが、現在の超精密加工で取り扱う寸法単位には、ナノメートル (nm) を使用することが多いので、超精密加工関連の生産技術を指してナノテクノロジー (nano-technology) と称している人もいる。

### 3. 対数の法則

本論に入る前に、もう一つ述べておきたいことがある。それは「対数の法則」である。これは世の中で起きる全ての現象は、例えば、複利計算される銀行利子の例や世界の人口増加は30年で2倍と云う様に、必ず、対数グラフで表すと直線となる性質があると云う法則である。

物事は全てこの事を念頭に置いて考えなければ誤った結論を導きかねないのである。勿論、我々の実験におけるデータの処理も例外ではなく、対数グラフ化しておかないと判断を誤る場合があるので注意しなければならない。

すなわち、対数でグラフ化して見た時に、もし或る直線からはずれ始めた場合には、要注意とみななければならないのである。非常に危ない場合が多い。したがって、すぐになんらかの手を打つ必要があると云う注意信号なのである。すなわち、現在従事している方法に見切りを付ける分岐点にあるのか、場合によっては、滅亡、あるいは、消滅が近づいている事を示す危険信号であるからである。直線から完全にはずれてしまった場合には、もう駄目と思って良い。挽回は不可能なのである。これは、工業界においても(勿論物理学界においても)同じである。どの業界においても、この現象を繰り返しながら、主役が交代してきたのである。

この様に片対数のグラフで直線上に並ぶ現象を「対数の法則」と呼んでいる。

本稿に関連する加速器の開発状況について調べていたところ、富家和男(敬称略、以降も同じ)の書物<sup>1)</sup>に、全く同意見のこの「対数の法則」を発見して我が意を得たりとの感を強くした。以下に富家和男の書物から引用する。

図2は、粒子加速器の種類別到達エネルギーを示したものである。粒子加速器は、到達エネルギーで7年に1桁と云う急激な進歩を遂げているのである。

昭和4年(1929)、ローレンツがサイクロトロンアイデアを発表してから、粒子加速器は目をみはるような展開をみせた。しかしながら、この大成功をおさめたサイクロトロンにも2000万電子ボルト付近に原

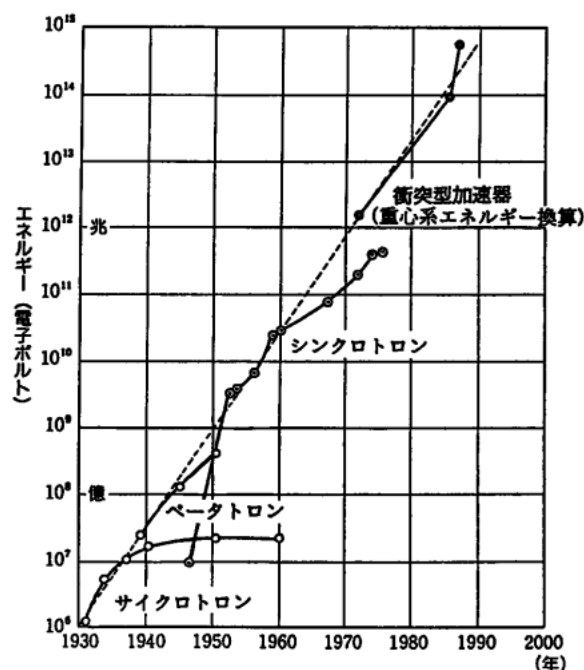


図2 陽子加速器のエネルギーの推移

理的なエネルギーの限界があることがわかり、大きなエネルギーを出すものが作れなくなって、グラフの曲線は、しだいに寝てきている。グラフが寝てきた時は、もうその原理にすがってはいは駄目で、早急に新しいアイデアを見つけ出さなければならない。

そこで次に登場したのが、ベータトロンである。これは、誘導電場で粒子を加速するアイデアであったが、これも3億電子ボルト付近で限界を迎え、その座をシンクロトロンに明け渡してしまうのである。

シンクロトロンは、いろいろなアイデアを加えながら急激にエネルギーを増加させていき、種々の輝かしい成果を挙げた。

さらに、加速粒子のエネルギーを有効に利用するアイデアとして、加速した粒子同志を正面衝突させると云う提案がなされた。これが衝突型加速器のアイデアである。

昭和47年(1972)、アメリカのスタンフォード大学に40億電子ボルトの電子・陽電子加速器が完成し、続いて昭和61年(1986)には、つくばの高エネルギー物理学研究所に250億電子ボルトの電子・陽電子加速器トリスタンが完成した。高エネルギー物理学研究所は、平成元年(1989)に、ヨーロッパのセルンに500億電子ボルトの加速器が完成するまでの2年8ヶ月の間世界一の座を保ったのである。

以上から明らかのように、加速器の到達エネルギーは、どの種類の加速器にもいきづまり、すなわち、限

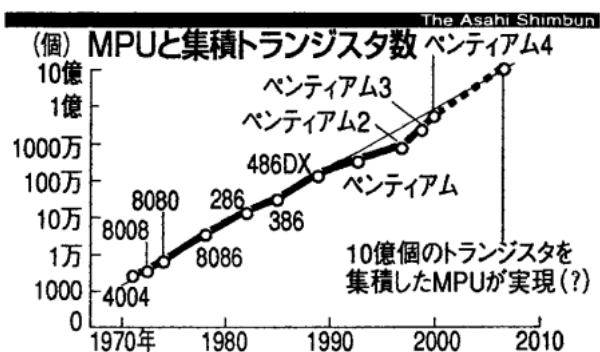


図3 開発されたMPUとトランジスタ数の推移

界があり、その都度技術を革新させながら、また、アイデアを重ねながら7年で10倍(1桁)の速度で増加させてきたのである。7年で1桁とは、血の滲む様な大変な努力であったことを忘れてはならない。

ついでに申せば、これらの次に計画されていたSSC計画が消滅して残念であるが、SSC計画をこのグラフから予測すれば、完成年度は、丁度今頃になっていたのではないかと推定できるのである。

ここでくどいようだが、もう一つ最近の例を挙げておく。

図3は、平成13年8月の朝日新聞<sup>2)</sup>に載っていた超小型演算処理装置(MPU)の集積トランジスタ数の推移のグラフである。これは、インテル社の創業者ゴードン・ムーアが、1965年に「18ヶ月で集積度は2倍になる」と云う予言を提唱し、半導体産業発展の指標となった有名な「ムーアの法則」と呼ばれているグラフである。事実、血のにじむ様な技術革新で超小型演算処理装置(MPU)は、その通りの進歩を遂げてきている。これによれば、10億個のトランジスタを詰め込んだ電子頭脳が2007年に登場するだろうと推測されることになるであろうし、これが半導体産業の技術目標となっているのである。

この様に、「対数の法則」は、諸現象の処理、推移に対する処理、将来の目標の設定などに特に重要視されてきた重要な法則の一つなのであるが、本稿の超精密加工に至る急速な加工精度発展の歴史にも適用されるので、特に詳しく説明させていただいた。

#### 4. 工作機械の歴史と時代の流れ

世界の近代機械加工の発祥は、1775年に、ウィルキンソン製鉄所で、ジェームズ・ワットが発明(1769年)した蒸気機関のシリンダの中ぐり加工を行った時とされている。すなわち、工作機械の歴史は、たかだか250年位の歴史しかないのである。

我が国において云えば、近代機械加工の発祥とされているのは、世界の発祥からさらに80年ほど遅れた安政4年(1857)で、徳川幕府の長崎製鉄所飽の浦工場(現三菱重工長崎造船所)に、オランダから工作機械18台をプラント輸入した時点を云うことにされている。今から、たった135年ほど前のことである。

それからの日本の産業は、追いつけ追い越せの必死の努力が始まるのである。まずは、資本の蓄積が無かったために、多大な固定投資を必要としない紡績、製糸の様な労働集約型の軽工業からスタートした。

特に、「ああ、野麦峠」の悲劇を生んだ生糸の製造に重点を置き、これにより、まずは、欧米の優れた技術を導入するに必要な貴重な外貨を稼ぐことから始めたのである。すなわち、言い換えれば、現在の日本の繁栄の基礎は、この時の女工達の血と涙で築かれたと云っても過言ではないのである。

この時代、すなわち、明治時代の会社繁栄ランキングを調べてみると、鐘紡を筆頭に、大坂紡、三重紡など圧倒的に紡績・紡糸産業が強い。明治29年(1896)における企業の総資産額ランキングを見てみると、紡績・紡糸産業が上位100社中57社を占めているのである。

その頃の機械工業の方を調べてみると、最初の出だしは、細々と政府指導型官営工場から始まっている。民間では、高価な蒸気機関などの設備は出来なかったので、大部分が原始的な人の力でベルトを廻す方式の機械を使用すると云う極めて惨めなレベルにあった。

民間の本格的な工作機械工場が現れたのは、佐賀藩出身であるからくり儀右衛門こと田中久重が、明治8年(1875)7月、東京の芝に田中製造所を設立したのが始まりとされている。田中製造所は、その後の明治26年(1893)になって、芝浦製作所<sup>\*1</sup>と名前を変えるが、その4年ほど前の明治22年(1889)には、田中製造所にいた池貝庄太郎が独立して旋盤で有名な池貝鉄工を創立している。

明治初期には、鐘紡、大阪紡、三重紡など圧倒的に強かった紡糸・紡績も、明治末期になってくると、企業は、「会社の寿命30年」<sup>\*2</sup>と云われている通り、目まぐるしく主役の交代が始まった。まず、次の主役と

<sup>\*1</sup> 芝浦製作所は、今から50年ほど前の、昭和13年(1938)12月、電気部門は、現東芝となり、機械部門は芝浦工作機械株式会社(東芝機械の前身)に分離独立し、本格的な工作機械専門の工場となっている。

<sup>\*2</sup> 日経ビジネス編「会社の寿命ー盛者必衰の理」(1984)と云う本が、「会社の寿命30年」と云う説をかかげ、ベストセラとなった。

なる化学・造船・食品などに技術革新の波が広がって、繊維が衰退して、旭硝子、麒麟麦酒などがトップの座に顔を出してきたのである。また、富国強兵で登場した有力企業は、第一次世界大戦後の昭和の大恐慌の荒波の中でもろくも消え去ってしまっている。

そして、昭和の初めになると、ようやく出現してきた各財閥が圧倒的な支配力を確立して、資本集約型の重工業時代を迎えた。

すなわち、製紙の三井、造船の三菱、金属の住友らに加えて、日本窒素、昭和電工、日立などが顔を出してきて、いわゆる財閥支配が始まるのである。

続いて、戦争が始まると軍需産業が一挙に主役となるのであるが、全てを破壊して終戦を迎えた。

戦後となると、廃墟の中から、まず、素材産業から復興を始めた。すなわち、八幡製鉄、川崎製鉄、富士製鉄などが先頭に立った「重厚長大」時代の幕開けである。

昭和30年代になると、ようやく生活にゆとりが出てきたので、素材産業が変わって、東芝、松下、三菱などの家電、トヨタ、日産、いすゞなどの自動車、立石、ソニー、シャープ、富士通などのエレクトロニクス産業の、いわゆる、「軽薄短小」の方向へ主役が交代した。特に、工作機械においては、昭和27年(1952)にマサチューセッツ工科大学でNCフライス<sup>\*3</sup>が発明されるや、いままで地味に、控え目で緩やかに発展していた工作機械は、突然大変身して、驚くほど急激な進歩を遂げ、現在の、全てがNC化・コンピュータ化した機械へと云う道を突き進んで来たのである。

昭和41年(1966)の工作機械見本市には、初めて国産のMC<sup>\*4</sup>が登場して、自動化・省力化へのテンポが急に目ざましくなって、即ち、昭和61年(1986)の第13回日本国際見本市においては、出品機611台中NC工作機械は504台(82.4%)を占めるに至ったのである。

また、昭和61年(1986)度の工作機械の生産額は、世界工作機械生産量の26%にあたる約9,000億円で、4年連続して世界一となったが、NC工作機械は、こ

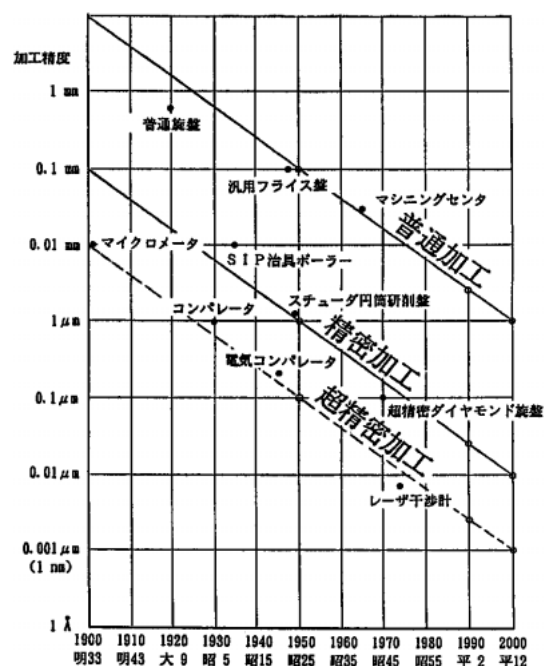


図4 加工精度の推移を示す谷口のグラフ

の10年間で、生産18倍、輸出35倍と云う急成長を遂げたのである。

豊橋技科大の星鉄太郎、京大の垣野義昭らは、以上の様な産業発展の歴史のなかで、各時代における世界最高の加工精度の出せる工作機械の精度、即ち、限界の機械加工精度を調査したところ、昭和10年(1935)のスイスシッパ社の治具ボーラー<sup>\*5</sup>の0.01 mm (以降、とくに断らない限り100 mmに換算した加工精度を云う)、昭和25年(1950)のスイススチュエダ社の円筒研削盤の1 μm などから、工作機械の加工精度は25年に1桁と云う急速な速度で向上していると云う「25年に1桁の法則」を発見した。

ついで、東大の谷口紀男は、これらを整理して、一般の工場で出し得る最高の精度は、大正9年(1920)の旋盤が0.8 mm、昭和23年(1948)ではフライス盤で0.1 mm、昭和40年(1965)でのマシニングセンタで0.02 mm、であるところから、一般工場の最高加工精度も、やはり25年に1桁と云う急速な速度で向上しており、それらの加工精度は、到達可能な限界加

<sup>\*3</sup> 世界で初めて、加工テーブルのX軸(たて)、Y軸(よこ)の2軸を、コンピュータで数値制御出来る様にした工作機械で、平面や自由曲面等が自動で加工可能となった。

NC=Numerical Control=数値制御

<sup>\*4</sup> MCは、マシニングセンタのことで、X、Y軸にZ軸(高さ)を加え、立体の自動加工を可能にした工作機械で、加工用工具も多数装着し、無人の加工運転も可能となった。

<sup>\*5</sup> 戦前のスイスの工作機械の精度は、世界一であった。特にその中でもシッパ社の治具ボーラーは桁違いに精度が高かったので、戦争末期には、軍から、当時の最新鋭戦闘機「紫電改」のエンジンシリンダーのボーリング(内面の仕上げ)加工用に徴用された。シッパ社と同様に、スチュエダ社の研削盤も、今でも他社の追従を許さない高精度を保っている。

工精度の2桁低いレベルにあることを発表し、図4(後述)の様な世界的に知られる「谷口のグラフ」にした。

## 5. 超精密加工の定義

機械加工精度が次第に高くなり、超精密という技術用語が、わが国に初めて紹介されたのは、1960年後半になってからである。

また、我が国で超精密加工を行える加工機の開発の必要性を公式に述べられたのは、昭和45(1970)年頃、米国カリフォルニア州にあるローレンス・リバモア研究所<sup>\*6</sup>を見学した際に、鏡面加工をしている超精密加工機を見てきた東大の佐田登志夫である。

この時には、まだ超精密加工と云う定義は無かったのであるが、昭和47(1972)年2月の精密工学会誌で、大阪大学の津和秀夫が、次の様に「超精密加工」を定義した。

その時代の一般工作機械の最高加工精度を普通加工精度と定義したとき、その時代の限界の精度、即ち、あらゆる手段を尽くしてやっと到達できる限界精度は、その2桁上の精度である。それを精密加工精度と定義する。その際に、そのもう1桁上の精度を超精密精度と定義し、その超精密精度と精密加工精度との間のレベルにある加工法を超精密加工と呼ぶこととする。

この定義をうけて前出の谷口紀男は、具体的数字、すなわち、限界精度の位置を昭和25年(1950)で1 $\mu\text{m}$ 、平成12年(2000)で0.01 $\mu\text{m}$ の2点の数字を決めて、この2点を片対数のグラフの上で直線で結んだ図4の様な「25年で1桁」のグラフ(「谷口のグラフ」)を完成させたのである。

このグラフから見ると、佐田登志夫がローレンス・リバモア研究所を見学された昭和45年(1970)年頃においては、0.2 $\mu\text{m}$ 以下の加工を超精密加工と云った時代であったと云える。いわゆる、超精密加工の精度は、その時代ごとに具体的数値は異なるのである。

佐田登志夫によると、「ダイヤモンドで切削した面が、見事な鏡面に仕上がっていた」と表現された。

ローレンス・リバモア研究所は、昭和37(1962)年頃からダイヤモンドバイトを使用した超精密加工に注目して、昭和42(1967)年には鏡面加工に成功していたのである。

鏡面と云う言葉は古くから使われているが、具体的にどの様な面であるかの明確な定義はない。しかしな

がら、言葉の意味から判断して、光がうまく反射してくれる面を云っていることには間違いがない。しかれば、光がうまく反射する面とはどう云う面を指すのであろうか。

光がうまく反射していると云うことは、正反射した光の方が、乱反射している光よりもはるかに強い場合のことを云う表現であり、これをもう少し光学的に厳密な数値で表現するとすれば、次の様に言い換えることが出来る<sup>3)</sup>。

光の反射は、光の波長 $\lambda$ とそれが反射する表面の面粗さ $\sigma(S)$ <sup>\*7</sup>とに左右されることが分かっている。

すなわち、面粗さ $\sigma(S)$ が光の波長 $\lambda$ より大きい時は、光が乱反射して鏡にはならないが、 $\sigma=\lambda/2$ に近づいてくると、ぼんやり顔が写りはじめ、 $\sigma=\lambda/8$ 以下になると完全に正反射する鏡となるのである。

我々が日常物を眺めているところの可視光線の波長を調べてみると、橙色光の方で $\lambda=0.6\mu\text{m}$ 、青色光の方になると $\lambda=0.4\mu\text{m}$ であるから、 $\sigma(S)=0.3\sim 0.2\mu\text{m}$ 位の面でぼんやり写る鏡になりはじめて、 $\sigma(S)=0.08\sim 0.05\mu\text{m}$ 以下の面で鏡と称するものになると云えるのである。

すなわち、この様に考えると、ローレンス・リバモア研究所で鏡面が出来ていたと云うことは、既に表面粗さ0.08 $\mu\text{m}$ 以下の加工面が出来ていたと云うことになるのである。

この様に、鏡面の面粗さの加工領域は、超精密加工の領域にあるところから、鏡面加工と云う言葉は、超精密加工と云う表現と同意義(鏡面=超精密加工)に使われる場合が多いのである。

それでは、どの様な努力をしてローレンス・リバモア研究所では、超精密加工の技術を手に入れたのであろうか。

次章以下で、このあたりを詳しく検証していきたい。

## 参考文献

- 1) 富家和男：光のスピードに迫る，[平2(1990)]，裳華房，98
- 2) 朝日新聞社：MPUと集積トランジスタ数，朝日新聞夕刊，[平12(1991)年8月10日]，14面
- 3) 森 勇蔵：超精密加工，精機学会関西支部基礎講座「精密加工の基礎」昭54(1979)，69

<sup>\*6</sup> LLNL = Lawrence Livermore National Laboratory

<sup>\*7</sup> 表面粗さの表示法の一つで、詳細は付録1参照のこと。

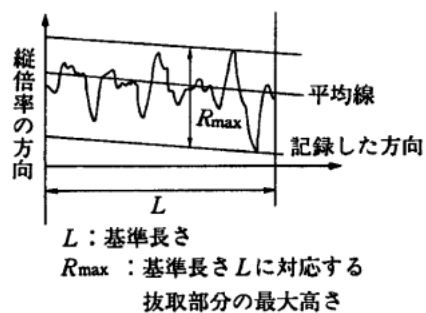


図5 表面粗さの説明図

## 付録1 表面粗さの表示方法

ここで示した表面粗さ  $\sigma$  は、最大高さ  $R_{max}$  と云う表示法で示した。図5に示す様に、基準長さ  $L$  の部分にある粗さ曲線の山の平均線を求めて、それに平行な線で粗さ曲線を挟んだ時の2線の間隔=幅、すなわち、山の最大高さを  $R_{max}$  と云い、その数値を  $\mu\text{m}$  で表示する時、その数値のあとに (S) を付加する。

なお、表面粗さ  $\sigma = R_{max}$  の値は、後述するが、加工した機械の主軸の振れを忠実に写しているものとされるので、本稿では、表面粗さを最大高さ  $R_{max}$  で表す方法を採用している。