

転がり軸受の発展を支えた周辺技術の源流

- 旋盤と研削盤を例として -

Origin of Supporting Technologies Promoting Development of Rolling Bearings

- Focusing on Lathes and Grinding Machines -

大山忠夫 T. OHYAMA

Rolling bearings were put into practical use through mass production at the end of 19th century by applying ball bearings to axles of bicycles. The development of rolling bearings depends on the iron or steel production technology and the machine tools such as a lathe and a grinding machine. The transition of iron or steel production technology can be referred to the Beck's energetic work "Geschichte des Eisens", for instance.

Here the origin and the transition of lathes and grinding machines to the early years of 1900s are mentioned.

Key Words: rolling bearing, origin of machine tools, lathe, grinding machine

1. はじめに

転がり軸受が大量生産により実用化されたのは、19世紀の末であり、その発端は自転車の玉軸受であるとされる。転がり軸受の発展にとって基盤となる重要な技術は、第一に鉄鋼の生産技術であり、第二は旋盤と研削盤を中心とした工作機械である。

鉄鋼の生産技術の変遷については、L. Beck著・中沢護人訳の膨大な著書「鉄の歴史(Geschichte des Eisens)」¹⁾があり、また、近代溶鋼技術の誕生と発展に関し、中沢護人著「ヨーロッパ鋼の世紀」²⁾で詳しく述べられている。さらに、戦後、日本で平炉法³⁾に取って代わったLD法(純酸素上吹転炉法)については、鉄鋼協会編「わが国における酸素製鋼法の歴史」⁴⁾が詳しい。

鉄鋼についてはそれらを参照して頂くとして、本稿では、軸受の大量生産を支えた主な加工技術である旋盤と研削盤に関して、その源流と1900年代初期までの変遷について概説する。

2. 旋盤の発達⁵⁾⁷⁾⁸⁾

2.1 古代から中世までの旋盤

旋削加工の源流は紀元前7世紀以前まで遡られ、紀元前3世紀に彫られたエジプトの壁画には、図1のような旋削加工の様子が示されている。ここでは、一人の人間が加工物に紐を巻いて交互に回転させ、他の一人が工具で削っている。その後、中世までは画期的な改善はなされず、加工物は木

材か軟金属で、基本的にこのような技術の状態が続いた。

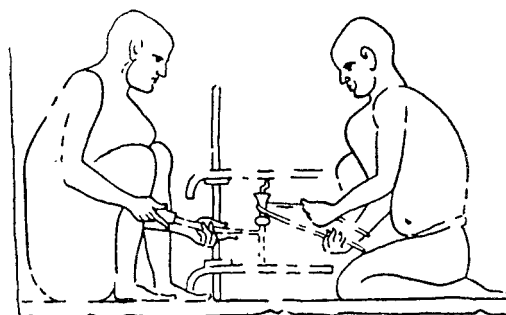


図1 紀元前3世紀の旋盤⁵⁾

The lathe in the third century B. C.⁵⁾

1395年にニュルンベルクで書かれた書物には、図2のようなポール旋盤が示されている。これは、ポール(撓み棒)の先端に結んだ紐を加工物に巻きつけ、その紐をヒンジの付いた足踏み板で引いたり緩めたりする動作で、加工物に交互の回転運動を与えるものであり、手で持った工具で加工する。このようなポール旋盤は12世紀後半に出現したとされる。また、1400年頃までには、木製の頑丈なベッドおよび主軸台と心押し台が登場している。

金属を加工するには、加工物を一方向に連続的に回転させる必要があるが、15世紀前半には、外周に紐を巻いた大きな輪をクランクで回し、その紐で加工物に回転運動を与える方法が出現した。クランクを回すのは、初め人力に頼っていたが、ニュルンベルクでは、16世紀末に水車を動力源に

使用したという記録がある。また、15世紀末までに、スライド機構をもつ工具送り台や刃物台も現れている。



図2 ポール旋盤(1395年・Mendelsches Bruderbuch)⁵⁾
The Pole lathe in 1395.⁵⁾

一方、1500年頃にLeonardo da Vinciはいくつかの機構図とともに旋盤のスケッチを残しており、図3は、弓と足踏み板で加工物を回転するねじ切り旋盤である。また、換え歯車を用いた図もある。これらが実際に製作されたかどうかは定かでないが、彼の後継者であるJ. Besson(フランス)は、1578年に親ねじと割りナットで工具を送るねじ切り旋盤を製作し(加工物は交互回転)、また、装飾品用の旋盤も示している。さらに、S. de Causは1615年に、フライホイールを兼ねる大円盤をクランクで回して加工物に連続回転を与える方法を呈示している。

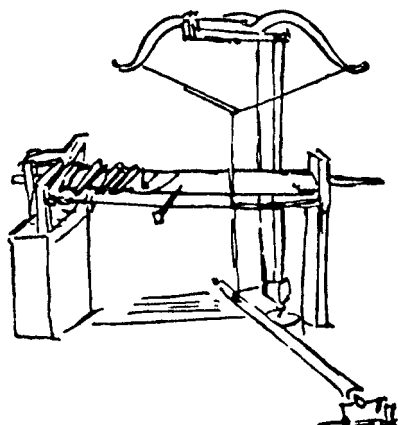


図3 Leonardo Da Vinciによるねじ切り旋盤のスケッチ
(1500年頃・Codice Atlantico)⁵⁾
Screw-cutting lathe, Leonardo Da Vinci, About 1500.⁵⁾

このように、BessonとCausは17世紀初めまで、装飾品用旋盤の基本要素である工具と加工物を機械的に制御する方法を導入した。その後、17~18世紀のバロック文化は装飾品用旋盤(ローズエンジン)の発展を促した。1671年に、Cherubin d'Orleansは、弓とクランクで、はずみ車の付いた多段プーリを駆動し、加工物を連続回転する方式を示し(図4)、また、主軸軸受を円錐状の滑り軸受としてラジアル荷重とスラスト力を受け、精度と摩擦の問題にチャレンジしている。

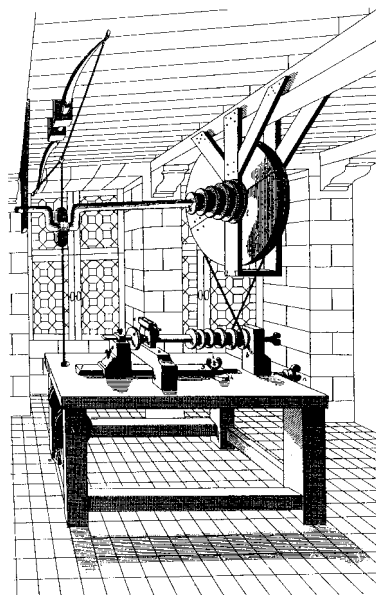


図4 Cherubin d'Orleansの旋盤(1671年)⁵⁾
Cherubin's lathe, 1671.⁵⁾

2.2 鉄を切削する旋盤の誕生

17世紀末まで、旋盤の加工物は木、象牙、角(つ)あるいは青銅などの軟金属であった。1701年にC. Plumier(フランス)が著した「旋削加工技術」においてマンドレル旋盤などの装飾品用旋盤に加えて、初めて鉄を加工する旋盤について記述している(図5)。主軸を鉄製とし、工具の形状と刃物台を示し、主軸軸受を錫または他の軟金属とすると述べている。また、スウェーデンのC. Polhemは1710年に、水車で加工物を回転するとともに親ねじを介して刃物台を駆動し、焼入れしたロールを旋削する方法を示している。その主軸や往復台は鉄製である。

18世紀半ばから、時計部品を製作する小型の全金属製旋盤が出現した。1741年のA. Thiout(フランス)による著書には、親ねじと換え歯車を備えた小型旋盤が示されている。さらに、J. Ramsden(イギリス)は1777年に割り出し盤付でダイヤモンド工具を用いた精密なねじ切り旋盤を発表してい

る。これらの旋盤には工具の長手および横送り装置が備えられている。

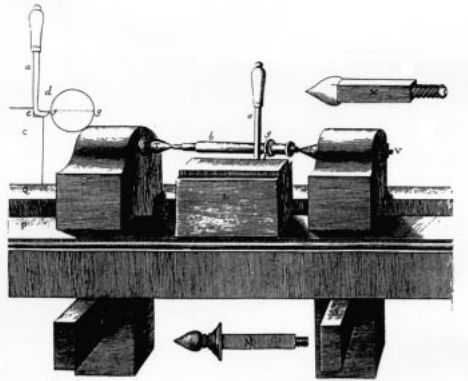


図5 C. Plumierの鉄切削用旋盤(1701年)⁵⁾
Plumier's iron-cutting lathe, 1701.⁵⁾

一方、汎用旋盤の源流として、1760年頃にフランスのJ. de Vaucansonは、台形の親ねじで刃物台が乗ったサドルを全ベッド長に渡って移動できる金属製の旋盤を製作した。加工物をセンチ間に支持するものであるが、その大きさは限られる。彼の後継者であるSenotは1795年に、Da Vinciが示唆したように主軸から換え歯車を通して親ねじを駆動するねじ切り旋盤を製作した。主軸は潤滑した2個の平軸受で回転し、加工物は簡単なスクリュウチャックと心押し台の回りセンタで支持される。アメリカではD. Wilkinsonが、1798年に水車駆動で往復台が親ねじと噛み合った二つの割りナットで駆動されるねじ切り旋盤の特許を取っている。ドイツにおいても、G. von Reichenbachが、1800年にベッドは木製であるが青銅の軸箱を備え3段プーリ駆動の旋盤を製作しており、金属製の工具送り台は長手と横送りに加えて旋回可能としているのが特徴である。

2.3 イギリスにおける旋盤の進歩

J. Wattの蒸気機関を成功に導いたのは、シリンダ内径を高精度に加工するJ. Wilkinsonによる中ぐり盤である(1775年)。Wattの蒸気機関が多用されるにつれて、その部品を加工するための専用工作機械を設備した工場が1790年代後期に建設された。M. BoultonのSoho工場がそれであり、また、M. MurrayのRound工場はそのライバルであった。Soho工場には大型の正面旋盤も設置された。これらの工場においては、複数の工作機械に蒸気機関からプーリとベルトによって集中的に駆動力が与えられた。

近代的汎用旋盤は、(1)必要な大きさの鉄鋼加工物を旋削できること、(2)加工物の回転と工具送り台を駆動する動力源および適当な主軸台と往復台

を備えていること、(3)構造上、ベッドは十分な剛性と精度を有すること、(4)加工物に応じて柔軟性があること、(5)適正なコストで量産が可能であること、などである。1800年代初期には、このような条件を満足する旋盤が登場してくるが、それに対して大きな貢献をしたのが、イギリスのH. Maudslayである。それまで、主軸台や往復台など旋盤の各要素については、既知であったが、彼はそれらを総合的にまとめて設計し、近代的汎用旋盤の基礎を築いた。1797年、1800年、1810年にねじ切り旋盤を製作しているが、とくに、主軸台と心押し台を装架して往復台が移動するベッド表面を精密に仕上げる方法や親ねじの精度を得ることに工夫し、また、精密な回転を得るための主軸軸受(滑り軸受)の改良や工具の横送りねじに目盛りダイヤルを付けるなど、加工精度を確保することに留意した。

MaudslayのもとにいたR. Robertsは独立して1817年に汎用旋盤を製作した。これは、ベッドを鋳鉄、案内面は逆V字型とし、換え歯車、バックギヤ、早戻り装置を備え、より近代的旋盤の姿に近くなった。同様にMaudslayの弟子のJ. Clementも独立して正面旋盤を製作した(1827年)。この特徴として、大直径のワークを正面旋削する際に、2個の円錐プーリを組み合わせて工作物の中心と円周部での切削速度を一定に保つようにし、また、焼入れした鋼製主軸軸受の油潤滑について特に工夫した。さらに、J. Foxは1820~30年代に大型の旋盤を設計・製作し、国外にも輸出した(図6)。

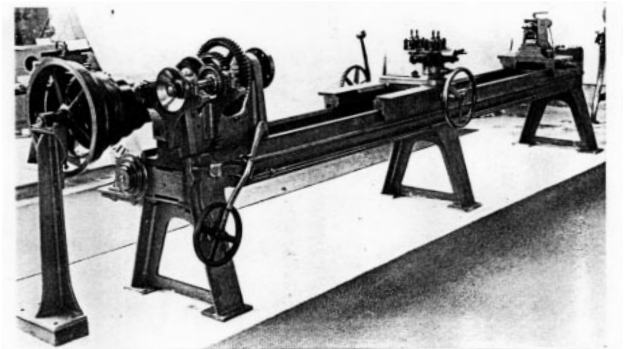


図6 J. Foxの大型旋盤(1820~30年)⁵⁾
Lathe by J. Fox, 1820-30.⁵⁾

1830年代後半にJ. Whitworth(イギリス)が製作した旋盤は、箱型ベッドで剛性を増加し、ウォームギヤと傘歯車による自動横送り、ラックとピニオンによるサドルの駆動方式などが採用され、現代につながる汎用旋盤の基礎が築かれた。なお、Whitworthは標準ねじ(ウィットねじ)の提案や測長器の製作でも大きな貢献をし、工作機械メーカ

として1851年のロンドン万国博覧会に他を凌ぐ多くの工作機械を出品し注目を惹いた。

2.4 アメリカの状況と切削工具の進歩

英国でWhitworthが君臨していた頃、アメリカの旋盤はそれに比べてかなり遅れていたが、F. W. Howeなどの貢献によってフライス盤の開発は進んでいた。小型兵器の大量生産の要求から互換性部品生産という考え方が採り入れられ、旋盤も小型部品のチャック式旋削の方向に進んだ。そして1845年に、S. Fitchによって初めてタレット旋盤が設計・製作された。これは横型のタレットを用いるものであるが、その後、Howeが縦型タレット方式の旋盤を製作し、後者の方が広く採用された。さらに、1873年にC. N. Spencerがねじ切り自動旋盤の特許を取り、多軸自動旋盤へと発展した。倣い旋盤の原型は、1818年に木工用のものに見られるが、その後Howeは1848～1852年に精密倣い旋盤を完成している。

旋盤の発達には切削工具の進歩に大きく依存している。英国シェフィールドにおいて、B. Huntsmanがるつぼ製鋼法により炭素鋼の製造に成功したのは1746年のことである。それによって製作された切削工具がMaudslayなどによる旋盤の成功に大きく貢献している。1868年に英国でR. F. Mushetがタングステン合金鋼を開発し、マンガ鋼で製作された鉄道の車輪や車軸など高硬度の加工物を旋削する工具として必須のものとなった。

さらに、金属の切削に関して膨大な実験を行なって切削技術に大きな貢献をしたF. W. Taylorは1900年頃にBethlehem製鉄所のJ. M. Whiteと協力してクロム・タングステン・バナジウム合金の高速度鋼の開発に成功した。

3. 研削盤の変遷⁶⁾⁷⁾⁸⁾

3.1 研削盤の源流

砥石による加工の源流は、紀元前15000～5000年前の新石器時代まで遡られ、サンドストーンやエメリーなどの天然砥石によって石器を研磨することが行われた。紀元前5000年頃から青銅器時代に移行するに伴い、青銅は鍛造で加工されるので砥石による加工の必要性は小さくなったが、紀元前1200年頃からの鉄器時代に入って砥石による加工が再び重要となった。ただし、その後18世紀末まで、砥石による加工は鉄製刃物を鋭くしたり、表面を磨く作業に限定されていた。

研削作業を機械化するには、(1)回転する砥石車、(2)加工物を保持して砥石車に押し付けて相対運動

を与える手段が必要である。この意味で、真の研削盤と呼ばれるものの登場は、1830年代まで待つことになるが、クランクで砥石を回転させる方法は9世紀に見られ、また、15世紀には足踏み式で砥石車を回転する方法が登場している(図7)。水車による駆動は、1568年にニュルンベルクで描かれた絵に認められる。その場合、いずれも加工物を手で保持して研削するものである。



図7 足踏み式の砥石車(1485年・Schroeder)⁶⁾
Grinding wheel with treadle, 1485.⁶⁾

1500年頃、Leonardo da Vinciは、円筒研削盤や内面研削盤などいくつかのスケッチを残しているが、それらが実現されるのは1800年以降になる。また、17世紀後半に、望遠鏡や顕微鏡が発明されるが、そのレンズを研磨するための専用機が製作された。18世紀末に登場したWattの蒸気機関のシリンダーの内面を精密加工するために、1787年に中ぐり盤とともに内面研削技術が導入されており、また、蒸気機関の導入で砥石車の回転速度が高くなり、大きな加工物も製作されるようになった。

3.2 研削砥石の進歩

1500年頃にda Vinciが種々の研削盤の構想をスケッチした後、真の研削盤が実現するのに300年も要した大きな理由は砥石車にある。18世紀末までは、砥石の砥粒として天然のエメリー(酸化鉄とシリカを含む不純酸化アルミ)、サンドストーン(シリカや酸化鉄で天然に固められた石英)のほか、特殊な場合にダイヤモンドの粉が用いられた。その場合、軟金属や木で作った円盤の外周(場合によっては皮で被った)にエメリー粒を埋めて砥石車とした。しかし、天然エメリーは成分にばらつきがあり、特性が未知であるため、一体型砥石車として用いることはできなかった。サンドスト

ーンは、銃身や繊維機械のスピンドルを研磨するなど特殊な用途に使われた。

その後、高い加工精度の要求と研削盤の発達とともに研削性能の向上が求められ、その方策の一つとして、高精度に旋削し回転バランスを取った鋳鉄の円盤の外周に、主としてエメリー砥粒をにかわで付着させた砥石車が用いられた。

1825年に天然のコランダム(純酸化アルミ)がインドからイギリスにもたされた。その頃、コランダムとレジンとを混合して、加熱、成形、硬化させた砥石車が試作され、1837年頃までにイギリスでエメリーをレジンを結合した一体型砥石車が製作され、商品化された。また、1860年頃まで、加硫ゴムを結合材とした砥石車がイギリスとアメリカで開発された。さらに、ビトリファイドボンド砥石の特許は、1842年にイギリスのH. Barclayが取得し、商品化されたのは1872年である。なお、本格的なレジノイド砥石の実用化は1920年代以降とされる。

砥粒については、1895年頃までにコランダムがエメリーに取って代わった。ただし、良質の天然コランダムは生産量に限りがあったので、特性が均一で制御可能な砥粒の開発が望まれていた。1891年に、E. G. Acheson(アメリカ)がSiCの人工砥粒(カーボランダム)を発明し、カーボランダム砥石は1896年に商品化された。また、C. B. Jacobs(アメリカ)は1897年に人工のコランダムの開発に成功し、1899~1900年に大規模な実験を行った後1906年頃までには、アラランダムという商品名で天然コランダムに取って代わった。

3.3 近代的研削盤の誕生

18世紀末~19世紀初に銃身やサーベルなどを研磨するために、砥石車が用いられ、また、アメリカでは、1833年にJ. Bridgeは砥石車を横送りするトラバースグラインダーを示し、1844年にJ. Wheatonが繊維機械用のスピンドルグラインダーの特許を取った。スコットランドでは、J. Whitelawが、プリー表面を加工する全鉄製の円筒研削盤を1838年に発表している。イギリスのJ. Nasmythは1845年に、直径が約2mの鋳鉄製円盤の周囲に12個のセグメント砥石(サンドストーン)を埋め込んだ研削盤を製作した(図8)。1853年には、アメリカのS. Darlingが横型平面研削盤を開発している(図9)。特殊な研削盤としては、1853年にH. BarkerとF. Holt(イギリス)が、鉄製の円盤に付けた円周溝の中でエメリーにより鋼球を研磨する装置で英国特許を得ている(図10)。

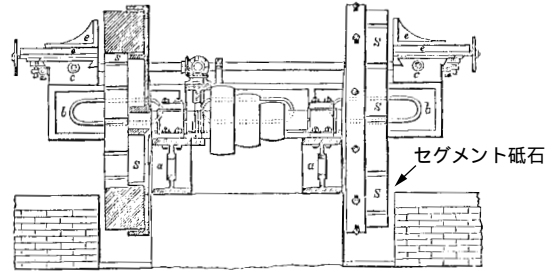


図8 J. Nasmythのディスクグラインダー (1845年・Byrne)⁶⁾
Nasmyth's disk grinding machine, 1845.⁶⁾

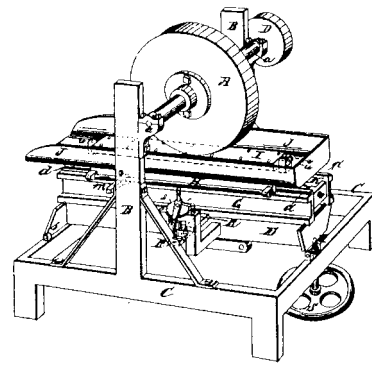


図9 S. Darlingの平面研削盤(1853年・米国特許)⁶⁾
Darling's surface grinder, 1853 (USA Patent).⁶⁾

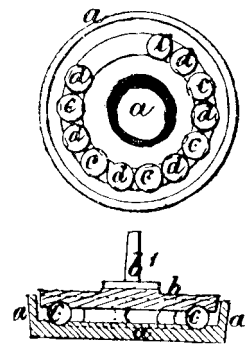


図10 H. Barker とF. Holtのボール研磨装置 (1853年・英国特許)⁶⁾
Barker and Holt's ball grinding Machine, 1853 (British Patent).⁶⁾

19世紀の半ばには、砥石車の回転と送りは外部動力により、また、円筒研削ではワークが両センチ間で支持され動力で回転される機構となり、往復台上に砥石車が設置され、ベッド構造も鉄製となり剛性が高められた。種類も、円筒、内面、縦型および横型平面研削盤、特殊研削盤と殆どのもので出現した。残された項目は、精度と送り機構および砥石車そのものであった。

精度に関しては、アメリカで1860年代初期にC. S. Moseleyが時計工業用の精密研削盤を設計し、1872年にA. Websterが改良を加え、互換性のある

時計用部品の製造が可能となった。一方、重研削の分野でも精度が求められる、その例は、J. M. Pooleが1870年頃に設計した製紙工業用精密ロール研削盤(図11)であり、いわゆる心無し研削盤の機構となっており、エメリー砥石車を使用している。

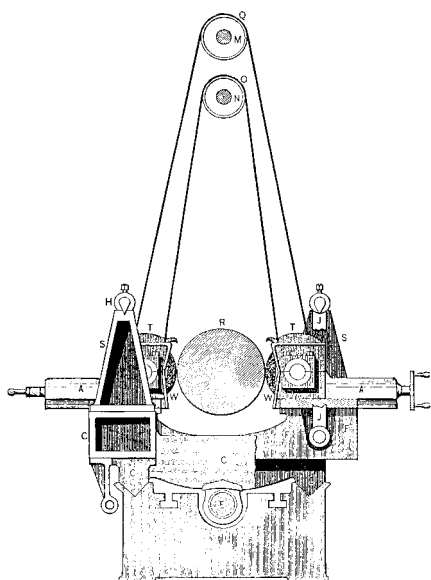


図11 J. M. Pooleのロール研削盤の構造
(1870年・Rose)⁶⁾
Basic principle of Poole's grinder, 1870.⁶⁾

近代的な研削盤の登場にとってエポックとなったのは、1876年のパリ万国博覧会に出展されたJ. R. BrownとL. Sharpeによる万能研削盤である。両者は1860年代にミシンの製造を行っていたが、その部品加工に開発した旋盤用の研削装置を汎用研削盤に発展させて出展したもので、ワークヘッドと砥石車ヘッドは共に回転機構を有する。1880年には、これに内面研削装置がアタッチメントとして付け加えられた。

鋼球の研削加工は、前述のBarkerとHoltによる方法(1853)では玉軸受に用いる精度として未だ不十分であった。1887年に、H. Richardsonは上記の原理を踏襲しながら高精度のボールグラインダーを開発して精密球の製造に成功し、ボールベアリングの実用化に貢献した。他方、1890年代以降、玉軸受のレースを研削する装置が開発され、1896年にBrown & Sharpe社が自転車用玉軸受のカップとコーン用研削盤を開発し、1899年にはPratt & Whitney社が、より標準化した玉軸受レース用の専用研削盤(図12)を市場に出した。

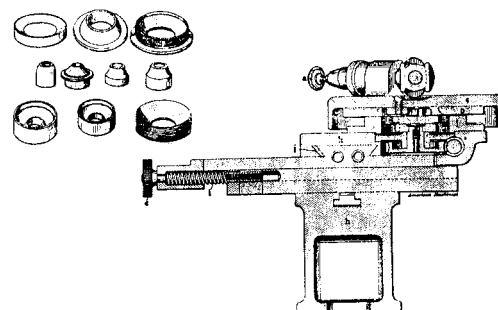


図12 Pratt & Whitney社の玉軸受レース専用研削盤
(1899年・American Machinist)⁶⁾
Pratt & Whitney ball bearing grinder, 1899.⁶⁾

1890年頃までに精密研削盤の基本技術はほとんど確立され、軽研削の分野で広く採用されるようになった。Brown & Sharpe社を辞めてNorton Grinding会社の技師長となったC. H. Nortonは1900年代初期に、幅広く径の大きい砥石車を用いた重研削専用の生産型研削盤を設計・製作し、世に出した。Nortonは、砥粒の自生作用の発見など研削技術の面で大きな影響を与えた。

英国のF. W. Lanchesterは1900年代初期に自動車の製造・販売をしたが、変速機と後車軸に初めてローラーベアリングを採用し、その円筒ころを高精度で加工する機械を考案した。それはころ長さの4～5倍の長さの焼入鋼を高精度で研削加工した後、薄い弾性砥石で切断する方法であった。

内面研削盤については、1887年に英国のC. F. BeyerとR. Peacockがプラネタリ型研削盤の特許を取り、アメリカのJ. Healdが1905年に砥石車が遊星運動する内面研削盤を製作し、ドイツのMeyer & Schmidt社も1902年に同様の内面研削盤を発表している。1933年にHeald社は加工物をチャックで取り付ける必要のない心無し内面研削盤を開発し、転がり軸受の製造などで有効な手段を提供した。

心無し外面研削盤では、Pooleのロール研削盤(1870)に源流が見出されるが、現代につながる画期的な発明を行ったのは、1915年にL. R. Heimである。それは、1個の砥石車と1個の制御車で構成され、加工物はブレードで支持される。これは1922年に実用化され、円筒ころ軸受のころを高精度で大量生産する場合などに大きく貢献した。

4. おわりに

本稿では、旋盤と研削盤の源流と1900年頃までの変遷について概説したが、その後20世紀における工作機械の進歩は、自動車産業の発展と極めて密接な関係にある。すなわち、自動車部品の専用

工作機械が多種にわたって開発されるとともに、自動化が急速に進んだ。

切削工具の材料に関しても、高速度鋼に次いでアメリカでコバルト・クロム・タングステン合金（ステライト）が1919年に開発され、さらに、ドイツのKrupp社で1928年にタングステン・カーバイト工具が実用化された。その結果、切削速度も著しく向上し、さらに、その後の超硬工具の進歩には目覚ましいものがある。

旋盤や研削盤の主軸に転がり軸受が採用されたのは、比較的遅く1930年代以降とされている。その理由は、工作機械の設計者が要求する軸受の回転精度を満足することが難しかったためであるが、その後の技術開発を基にした転がり軸受の採用により主軸の回転速度が著しく高くなり、工作機械の高性能化に大きく貢献している。

参考文献

- 1) L. Beck著，中沢護人訳：鉄の歴史（Geschichte des Eisens）- 全19巻，たたら書房（1968～86）
- 2) 中沢護人：ヨーロッパ鋼の世紀，東洋経済新報社（1987）
- 3) 青山芳正：平炉の四季（上・下）- ある生産技術の盛衰，金属，47，11；12（1977）5；43.
- 4) 鉄鋼科学・技術史委員会編：わが国における酸素製鋼法の歴史，日本鉄鋼協会（1981）
- 5) R. S. Woodbury：History of the Lathe to 1850, Society for the History of Technology；printed by Nimrod Press Inc. (1961).
- 6) R. S. Woodbury：History of the Grinding Machine, The M. I. T. Press (1958).
- 7) W. Steeds：A History of Machine Tools 1700～1910, Oxford at the Clarendon Press (1969).
- 8) L. Day and I. McNeil：Biographical Dictionary of the History of Technology, Routledge (1996).

筆者



大山忠夫*
T. OHYAMA

* 営業本部 工学博士