

## 最近の工作機械研究の動向と 加工精度向上のための問題点

大阪大学基礎工学部 山 本 明

### 日本の工作機械の水準

10月15日から大阪・港区の常設見本市会場で第3回日本国際工作機械見本市が開かれた。出品申込み時の不況から規模は少し縮小され、大型工作機械は敬遠模様となった。国内各メーカーが年を追って高級工作機械を手がけるようになり、輸入しなくて事がたせるほどのあらゆる機種に進歩した工作機械が作れる感じをうけ、デザインのすぐれてきたことも目立つ。実用機を中心に積極的にユーザにPRしようとする意気込みも大きい。

一般的に自動化と操作性、安全性 (fool-proof) の向上に力を入れており、オートローディング装置を付属させたものも多い。また、数値制御 (Numerical Control: NC) 工作機械によって自社の水準を示そうとしたところも多く、20数台に及ぶ。需要の一部はNC工作機械に向っているのである。このNC工作機械の出現は1952年MITのサーボ機構研究室で完成されたフライス盤に初まるのであるが、高度に発達した電子技術、生産性向上に対するとくに軍事上の要求によって、米国で急速に実用化され、1965年末では稼働台数7,000台といわれる。そして1975年には工作機械生産台数の35~40%がNCになるであろうとのことである。このように、NC工作機械がイニシャル・コストが高価であるにもかかわらず、その需要が増大していく原因はいうまでもなく生産性の向上が期待できる点にある。さらに生産性の上からますます工夫が加えられ、自動工具交換装置 (Automatic Tool changer: ATC) をつけることにより、1台の機械で1回の段取りによって、ボーリング、ドリリング、ミーリングなどの作業が行える Maching Center とよばれるものも現われた。

さらに、NC はつぎの形でも伸びようとしている。その1つは、電子計算機を組入れることによって、工具の先端または加工物の表面からフィード・バックをとって工具の摩耗、構造・加工物・工具の弾性変形による逃げなどの誤差を補正して、加工精度を向上させようとするものである。もう1つは、Sketch Pad 方式とよばれるもので、電子計算機の利用による設定の自動化 (Computer Aided Design; CAD) を計ろうとするものである。

NC 工作機械の制御方式は位置ぎめ制御と連続切削制御 (Path Control) に分れる。見本市にみられたものは前者と、後者の中の直線切削が多い。これはあながち初歩的とばかりいえず、ユーザの必要性とふところ具合を考えた売れるものというところにもねらいがあろう。また、上にのべた将来への方向にそったものの出品もある。1回の加工物取付けでできるだけ多くの加工が行えるよう、タレットヘッドとか ATC をつけたものもあり、たとえばテープの指令で主軸変速、タレット割出し、ねじ切り、テーパ削り、円弧削りなどが行える。また、少量生産において類似形状のものを集めて、多量生産と同様な効果を挙げる類形加工を行うものもある。これはロードに供給する数種の素材の加工条件と加工工程をテープで与えておき、機械が素材の直径と長さを検出すると、テープの相当部分を選択して加工を行うのである。さらに、マシニング・センタの出品もある。

こういった華やかな、量産をねらった機械の蔭にかくれて、オーソドックスな汎用機の出品も、デザイン、操作性と生産性向上の手段をきそう。

さて、日本の工作機械は十数年の間にいわゆる戦後期をのりこえて、最近では上にみるように世界的な工作機械生産国となった。その技術的水準も高い。表1にその躍進ぶりをみることができる。表2にデータが少し古いですが、外国との対比を示した。十年ほどの間に、わが国ほどの向上を示した国は少い。水準は世界3~4位といいたところであろう。生産は37年度が最高で、内需も1459億に達した。その後内需の減少に伴って、生産も輸入も減少したが、輸出は着実にのびている。昭和40年度は90億の輸出目標を達成し、41年度は110億にいどむ。工作機械の需要のましてきた米国の足もとをねらったの滞貨と不況のはきだしだけでなく、また自由化に対処して、発展が大いにのぞまれる。生産額に対する輸出額の比はまだ小さく40年度で生産の13%である。これに対し輸入は内需の19%にあたる。

表3にメーカー数の比較を示す。最近の通産省の調査によると、大手メーカーは5社で、それぞれ従業員1500~4500人、生産額33~56億円、マーケットシェアは4~6%程度であるのに対し、300人未満の中小企業が約200社、全体の74%を占める。工作機械業界は需要変動が大

表1 わが国における工作機械の生産量と輸出の推移

年 度	生 産 高		出 荷 高 台 数	輸 出 金額 (千円)	輸 入 金額 (千円)
	台 数	金 額 (千円)			
26	9,139	1,080,930	8,923	286,282	133,636
30	18,147	3,680,477	18,163	715,384	4,041,881
35	80,143	45,169,216	79,854	1,623,689	19,701,408
36	114,959	81,882,165	112,940	2,433,617	38,898,665
37	104,701	100,892,429	101,326	2,587,919	47,581,503
38	120,541	95,132,018	120,680	4,294,962	22,796,079
39	131,053	90,906,090	127,249	6,508,942	21,319,640
40	90,356	70,348,624	90,365	8,943,390	13,962,967

日本工作機械工業会：工作機械ニュースによる

表2 主要国の工作機械工業の状態

年別	国別										
	西ドイツ	アメリカ	イギリス	イタリー	フランス	スイス	スウェーデン	ベルギー	オーストラリア	オランダ	日 本
生産額	(億円)										
1953年	872.9	5,140.8	666.3	141.1	390.1	248.0	78.6	49.5	19.2	12.1	36.8
1955	1,150.1	3,158.1	759.0	155.2	448.6	275.2	70.6	38.3	36.3	17.1	36.8
1957	1,601.7	3,963.5	959.6	195.6	458.6	312.5	112.9	53.4	25.2	22.2	155.5
1959	1,657.2	2,392.0	793.0	215.7	476.8	373.0	75.6	47.4	26.2	28.2	243.2
1961	2,565.4	2,362.8	1,166.3	751.0	672.3	457.6	—	82.7	40.3	38.3	817.7
1962	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,008.9
輸出額	(億円)										
1953年	488.9	764.1	229.8	75.4	103.8	176.4	29.2	35.3	7.1	—	4.1
1955	493.9	374.0	204.6	80.6	60.5	199.6	42.3	31.2	13.1	—	7.2
1957	753.0	658.2	275.2	86.7	65.5	235.9	68.5	40.3	14.1	—	7.2
1959	826.6	458.6	227.8	94.8	83.7	261.1	40.3	35.3	16.1	22.2	5.0
1961	1,264.0	933.4	343.7	201.6	165.3	320.5	73.6	68.5	33.3	37.3	24.3
1962	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25.9
輸入額	(億円)										
1953年	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22.5
1955	129	58	183	98	94	76	64.6	57.7	—	81.5	40.4
1957	136	131	235	138	159	131	70.0	62	93.3	86.5	122.0
1959	181	117	179	68	138	82	100.8	60.3	96.5	74.4	104.5
1961	362.9	120.3	358.8	357.3	307.6	120.1	131.9	113.2	135.9	137.3	389.0
1962	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	475.7

日本工作機械工業会 1963年

表3 主要国機種別メーカー数

機種別	国 別				機種別	国 別			
	西ドイツ	イギリス	日本	フランス		西ドイツ	イギリス	日本	フランス
旋 盤	86	55	44	20	その他の工作機械	80	50	36	30
ポ ー ル 盤	49	32	22	21	ブ ロ ー チ 盤	5	9	1	2
フ ラ イ ス 盤	86	44	25	24	形 削 盤	14	11	4	5
中 ぐ り 盤	28	20	20	12	ホ ー ニ ング 及 ビ ラ ッ プ 盤	11	7	6	7
平 削 盤	8	11	9	5	金 切 り の こ 盤	33	25	3	9
研 削 盤	119	59	33	41	ね じ 切 り 及 ビ ね じ 立 て 盤	28	21	8	12
歯 切 ・ 歯 車 仕 上 機 械	29	16	21	5	専 用 機 械	35	9	9	—
					放 電 加 工 機 械	1	—	2	—
					そ の 他	23	9	8	10
					メ ー カ ー 総 数	318	165	95	125

産業構造調査会工作機械小委員会（1963）による。1つのメーカーで数機種にわたるものはだぶって数えてある。日本のものは工作機械工業会会員のもの、それ以外は200をこえる。

きいので兼業メーカーが多く、専業度は大手で59%、中小では87%である。

わが国では技術導入がかなり多い。ここで同じ事情にあるイギリスの考え方を紹介しておこう。技術導入して国内で作れば輸入するよりもはるかに安くできるといったものを、開発費を節約するために導入するのであって、イギリス国内や輸出面で大きな需要の見込まれるものは自力開発にまつべきであり、国産品との競合はさけるべきであるというのが基調になっている由である<sup>2)</sup>。技術の勉強とレベルアップのためにというのはよいことであるが、横文字レッテルの方が売れがよいというものは感心できない。

### 工作機械製造の合理化

一般に、工作機械の製造は高度の技術を必要とし、経験的要素が大きく、その品質・量を決定するものは熟練作業者の質と数であるといわれる。一方、工作機械の需要は景気の変動に応じて大きく動揺し、その振巾も年を追って大きくなる傾向にある。ある時期の増産につづく急激な生産調整時期の到来にいかに対処するかも、熟練者の払底と共に、メーカーの経営面・管理面における問題点である。戦後何度目かの不況期を迎えるうちに、

1. 製造機械を新鋭機におきかえる一方、工場規模の拡大を制限し、主として合理化によって量産とコスト低減をはかる。
2. 製品種類を整理し、多種少量生産より工場毎の少種多量生産に移行する。
3. ビルディング・ブロック方式、共用部品の採用。などの手段がとられた、また、最近では国際競争力強化のためにメーカー間に8つのグループを作るところにまで発展した。さらに、不況対策として、老朽機械のスクラップ・アンド・ビルド促進税制の創設、機械類賦払い信用保険法の活用などの政策もおしすすめられている。つぎに、上の合理化の例を挙げよう。
1. 高い熟練度を必要とする手仕上げ作業をできるだけ機械加工にうつす。たとえばすべり面のきさげ仕上げを平面研削とか精密フライス仕上げとする。
2. 寸法公差を検討し、選択組合せと現物合せをへらす。
3. 部品加工のライン化と専用治工具の整備によって、作業の単能化と工程低減をはかる。組かえのできる専用機を採用する。
4. 組立てのグループ別による単能化。流れ作業、コンベヤ・システムの採用。
5. 重要部品の検査、グループ検査、完成品検査の有機的結合。

などがあり、製造方式が数年の間に一変したメーカーが多い。

### 工作機械に関する研究とその最近の動向

工作機械に関する基礎的研究が取り上げられるようになったのは比較的近年のことである。従来切削・研削などの加工に関する研究論文に比べて極めて少なかったのは (a) メーカーとしてはアイデアとか経験の蓄積を直接製品の形で発表する。(b) 多種多様で大がかりとなるため、メーカー間の協力が必要であり、結果の還元状態が思わしくない。

などを原因とする。これに対し、新しい考案や開発は工作機械の進歩にとって重要な要素にはちがいないが、関連技術の進歩と工作機械の高度化に対処するためには、機械自体に対する基礎的検討の必要もあることが認識されはじめたのが、最近の活発化の原因である。これに公的な機関の援助が必要である。

基礎研究はヨーロッパ諸国において盛んであり、特にイギリスとドイツが群を抜く、その研究テーマの実情とか発表論文の詳細は文献<sup>2)</sup>と<sup>1)</sup>にゆずる。イギリスは工作機械工業発祥の地であり先進国であるが、戦後における技術革新によってアメリカおよびヨーロッパ大陸諸国の工作機械工業の生産ならびに技術水準が著しい向上を見たのに対し、おくれが目立つようになった。これに対処して、政府が研究体制の確立を計り、大学・研究所等の研究施設の整備、科学技術研究庁による補助の強化など強力な政策の推進がその活発さをもり立てたのである。その中でも主導的なものは Galloway 博士を所長とするイギリス生産技術研究組合、Tobias 教授を中心とするバーミンガム大学と Koenigsberger 教授を中心とするマンチェスター理工科大学が毎年交互に開催する工作機械の設計および研究国際会議であり、研究成果が発表される<sup>3)</sup>。ドイツでは Opitz 教授を所長とするアーヘン工科大学工作機械研究所の研究集会が著名である。これらでは工作機械の性能、構造、要素、制御技術、剛性と振動などの研究、討論がなされている。概して、きちょうめんの感じをうける。これに対し、自動制御とくに数値制御機構の要素とこれを取入れた工作機械の研究が最近アメリカに多くみられる。

ソ連ならびに共産圏では中共を含めて工作機械の量産をおしすすめている。ソ連ではエニムス(工作機械実験科学研究所)が著名であり、研究の最高峰で、基礎研究、応用研究と試作を行っている、そのすすめ方は国民経済の基盤上より必要なものから研究開発し生産にうつすという合理性をもつ。

数値制御が今後伸びるであろうことはすでにのべたが、多量生産をほこるアメリカにおいてさえ、生産の70~80%が中もしくは少量生産であるといわれる。この生産性向上の対策の1つがNC工作機械であるが、他にグループ・テクノロジー(GT)がある。これはソ連にはじまり、東ヨーロッパとドイツで大きな課題となっている。種々の段階があるが、中少量生産において多量生産に準じた生産性をあげるにはどんな手段がよいかを論ずるものであり、一方これを実現する経済的な工作機械としてはどんな形のもが開発すべきかを考える。はじめにのべた類形工作法もその1例であるが、加工品の統計的分類の結果からは半自動単能機、短床旋盤もふさわしいとのことである。

上で述べてきた基礎研究は長い歴史を経て定型化した工作機械に関してだけに止まらず、飛躍的な性能の増大と画期的な革新を求めるには、急速に展開されつつある科学一般からえられる新しい基礎知識の応用開発と、天才的な発明の大胆な導入が必要であることはいうまでもない。工作法には電解加工法などにこの例をみることができる。

## わが国における工作機械の研究

さて、わが国の状況はどうであろうか。戦前、当時の主要工作機械メーカーなどを含む寄付金によって設立された東京工大精密工学研究所、海軍の工作機械実験室、機械試験所などと各大学で基礎研究が行われていたが、戦後は全く沈滞し、最近ようやく活発になってきた。精密工学研究所が数値制御を取り上げ(昭33)、旋盤でならい削りに成功して国内に反響をよび、日本工作機械工業会が優秀機械の性能解析研究、機械試験所が治具中ぐり盤の数値制御による自動化研究などを行うにいたって、漸やく各方面で盛んになったのである。機械試験所のものは剛性、すべり面などの機械的基礎研究、光学的位置ぎめ機構と電氣的制御の基礎研究の総合努力が実を結んだものといえる。また、工作機械工業会が旋盤、フライス盤、研削盤(円筒、平面)、ラジアルボール盤、アップライトボール盤の各機種毎に静剛性、動剛性、熱変位、すべり面、歯車などの研究を機械試験所などの協力を得て現在実施中(基礎技術研究特別委員会)であるが、二三年前よりよい結果が出はじめている。

この間、各大学での研究も多く行われるようになり、またメーカーが独自研究し、あるいは技術導入後わがものとしてさらに発展させた成果も現実の機械とし実現されているものが多い。

研究成果の例として、漸やく盛んとなりはじめた昭和

35年(1960)以降に発表された主なものを挙げてみよう。35年には、構造的なものとして、長岡、後藤の精密旋盤主軸に関するもの<sup>4)</sup>、須田の接線送り心無研削盤の試作<sup>5)</sup>などがある。工作精度に関しては、角田の内面研削盤の自動定寸機構の工作精度に及ぼす影響<sup>6)</sup>、心無研削盤の工作精度<sup>7)</sup>に関する研究がある。また振動に関するものとして、井上の旋盤の軸受すきまと工作物の振動の関係性を調べたもの<sup>8)</sup>、杉本のバイトの振動<sup>9)</sup>、井上・栗田のフライス削りの振動<sup>10)</sup>などがある。

36年には、明山ほかのかさ歯車の加工方式を簡易化したかさ歯車連続研削盤の試作研究<sup>11)</sup>、角田の砥石軸の剛性の工作精度への影響を調べたもの<sup>12)</sup>などがみられる。

37年には、中田が33年に発表した自動制御を利用して工作精度を向上させる構想を実現したものとして、フィードバック制御精密ならいホブ盤の試作研究<sup>13)</sup>、およびねじ切りの研究<sup>14)</sup>が行われ、歯車・ねじの精度向上に貢献している。このほか、円筒研削盤の製造に組立コンベアシステムを利用した報告<sup>15)</sup>があり、生産方式に新たな発展を与えた。

38年には、機械試験所で行われた剛性・熱変形に関する研究成果が見えはじめる。とくに、動剛性に関するものとして、旋盤主軸<sup>16)</sup>、旋盤工作物<sup>17)</sup>、ひざ形横<sup>18)</sup>および立フライス盤<sup>19)</sup>の固有振動数に関する研究が本田・安井などによって発表され、工作機械の剛性に関する基礎技術的研究としてまとめられている<sup>20)</sup>。

39年には、本田らによって工作機械の熱変形<sup>21)</sup>についての報告があり、工作機械用歯車を対象にして、会田らの強度に関する研究<sup>22)</sup>、石川らの精度に関する研究<sup>23)</sup>も発表された。16)~23)はさきののべた工業会の基礎技術研究の一環をなす。また、中田はジョージ・フィッシャー KDM-18 ならい旋盤における油圧制御装置の特性について解析を行っている<sup>24)</sup>。

研削盤また加工物と砥石も研削抵抗によってたわみ、これが精品精度をそこなう。塩崎はこの弾性変形が製品形状と精度に及ぼす影響について、前報の砥石切込み量に及ぼす影響<sup>25)</sup>につづいて、研削条件と作業方法の影響を解析して<sup>26)</sup>いる。また、40年度に、後藤ほかによる工作機械用精密玉軸受とそれを使用した主軸の変形・振動・音響を調べたもの<sup>27)</sup>、松崎がフライス加工中の油圧駆動テーブルの振動を研究したもの<sup>28)</sup>、福田の数値制御によるホブ盤回転誤差の補正の研究<sup>29)</sup>、ポリゴン断面切削用旋盤でバネの強さが切削精度に及ぼす影響<sup>30)</sup>を調べたものがみられる。この年には、アメリカではひびり振動に関する研究が多く発表されており、振動中の切削機構の解析、相関関数分析器による解析、工作機械の安定不安定を示す境界線を計算する理論式の導出、クローズド

・ループ理論の実際への応用などの論文がみられる。

### 精度からみた工作機械の重要点

まず、工作機械に対する一般的な要求を挙げよう。これは要求する形状・寸法・精度のもの（正しい製品）を確実に、最短時間と最小費用でえようとする機械加工技術向上の目標と一致するのである。

1. 許しうる公差内で要求する形状・寸法・表面性質をもつものが確実にえられ、かつ作業者の熟練度によることが少ないこと（運動の正確さと機械の剛性）
  2. 最近の進歩した加工材料および工具材料に適した加工条件をとることができ、生産性が高いこと。将来の動向も考慮し陳腐化が遅く、融通性のきくこと。
  3. 加工能率、操作性、安全性、経済性。
- などである。生産性は工作機械以上の精度を要求せず、コスト的にえやすい精度を扱って、むだ時間をできるだけ排除し、少い工数で製品をえようとするときに高いといえる。

そして、工作機械の加工精度は加工中における工具と加工物の時々刻々の相対位置と、その時間的経過で基本的にきまり

- a. 運動の正確さ
  - b. 機械構造・工具・加工物の剛性
  - c. 熱膨張
  - d. 振動源の排除
- などに関係する。

上で、剛性は

静剛性 (stiffness) : 弾性変形 (のび, ちぢみ, たわみ, ねじれ) とがた

動剛性 (rigidity) : 振動

に分けられる。いずれも (静荷重もしくは加振力/それによる変位) の形, すなわちバネ常数であらわすのである。これらの弾性変形は構造物としてさげられない。静剛性と熱膨張の工作精度への影響はあとでべるように、意外に大きくわれわれがのぞむ工作精度と同じ位か1桁悪いオーダの値になることが多いのであって、実際では好ましい状態に早く安定し、その状態を加工中維持することを必要とする。最近、 $0.1\mu$  オーダの加工精度を必要とする超精密工作の必要が電子工業などの分野で高まってきたが、その加工機械と加工法において、この剛性が切りうる最小厚さ、ないし食つき現象と凝着現象、測定の確かさなどととも大いに問題となる。

また、工作機械の自動化が進むに伴って、上のa項に関連して自動化を完全なものとするために、サーボ機構も含めた制御サイクルの安定性、応答速度が問題となり、

駆動系と案内面に低い摩擦抵抗と最小すきま、スティック・スリップの排除を要求する。さらに自動読取り機構と運動の精度補償法も開発の焦点となる。

つぎに、とくに加工精度に注目して、問題点の二三をうへの研究成果によって簡単にのべよう。

### 静 剛 性

つぎのように部分的に分けて考えることができる。

1. 機械構造部分の剛性
  - a. 構造部分 (荷重の種類と大きさ, 部材の形状・寸法・材質・支持方法など)
  - b. 結合部: 固定結合 (固定方法・フランジの大きさ・ボルトの長さ・接合面・しめつけ力など)  
運動結合: 軸受・案内面 (種類・潤滑法・油膜の厚さ・ガタ・バックエッシュなど)
2. 工具の剛性 (工具形状・寸法・張り出し長さ・砥石・工具固定状態など)
3. 工具支持具の剛性 (フライスアーク・中ぐりバー・砥石軸など)
4. 加工物とその支持方法を含む剛性

このうち、最近1.bが問題にされはじめた。これらの剛性は構造の形状・組立が複雑なことから、切削条件によって作用力の大きさと方向が変化する上、作業中作用点が移動するために非常に複雑になる。

まず、旋削と研削のばあいの2つの例をあげておこう。図1は旋盤で丸棒をセンタ支持して削るばあい、軸受・心押センタ・バイトにバネ常数 (剛性) を考える。軸受はクリアランスと受座の仕上りと組つけ状態で弾性変形し、一般に数十から十数  $\text{kg}/\mu$  のバネ常数をもつ。このために主軸センタは切削抵抗によってかなり変位する。バイトのバネ常数にはバイト・工具台・往復台・ベッドおよび案内面の接触状態の弾性変形が関係するが、いまこれと主軸のたわみを無視しても、切削抵抗の大きさとその動く位置 (切削の進行に伴い作用点が移動) によって両センタが変位し、また加工物もたわむので、加工物の形状はつぶみ形からたる形までいろんな形状に、いろ

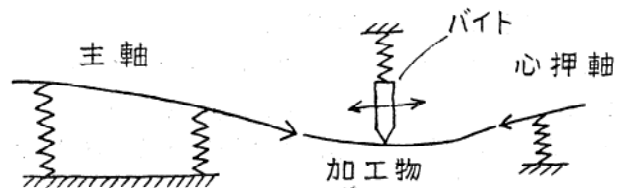


図1 加工物の仕上り形状に及ぼす弾性変形 (切削)

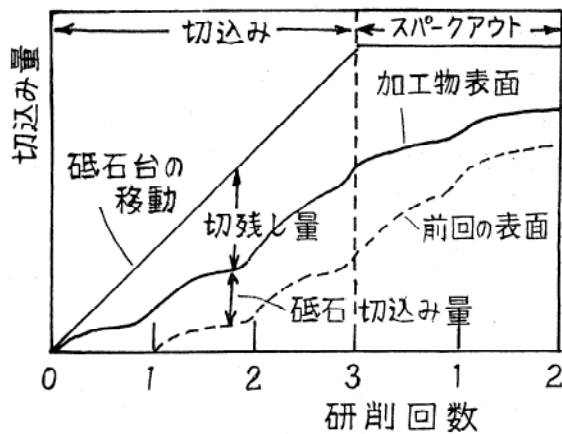


図2 加工物の仕上り寸法に及ぼす弾性変形(研削)

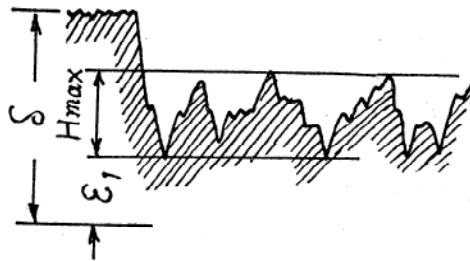


図3 切残しの1例, 焼入鋼の円筒研削(WA60K)

んな平均直径で仕上る<sup>10)</sup>。

研削でも同様で、さらに砥石軸と砥石の変形が加わるので、砥石台を切込んでも弾性変形のため実際切込み量はこれよりも小さく、切残しを生じる。強制切込みののち、切込みを与えないで研削(スパークアウト研削)しても何度も火花がでるのはこのためである(図2)。図3はこの実際例で、強制切込み量  $\delta=10\mu$  に対し、切残し(弾性変形量)  $\epsilon_1=3\mu$  で、最大あらさ  $H_{max}=5\mu$  も考慮に入れると  $8\mu$  も残ることになる<sup>25)</sup>。

構造体の剛性は断面形、リブなどに関係し、コラムやフレームではねじり変形と曲げ変形の2つを考慮するとき箱形構造がすぐれること、鋳鉄よりも鋼溶接構造の方がすぐれることが古くから指摘されており、また実施されている。後者はプレス・シャーなどに多い。いろいろな物を収めるために箱形構造に穴をあけるが、どんなに蓋としめ付け状態を頑丈にしても穴のないばあいに劣る。とくに、ねじりに対しては40%位にしか回復できない<sup>1)</sup>。また、フライス盤・ボール盤はコの字形の構造をしているので、どうしても加工物と工具の間の変位が大きくなり勝ちなことはよく知られている。

旋盤のベッドの変形は予測することがむづかしく、実物実験とか模型実験によらねばならなかったが、最近千鳥形リブを入れたばあいについて近似計算式が発表された<sup>21)</sup>。千鳥形リブによってねじり剛性は約2倍になる。

一般のベッドは上方からの曲げよりも横からの曲げに弱く(たわみは2~3倍)、さらにねじりに弱い。このために、中央がたわみ、すべり面が前下りになる傾向をもつので、曲げのたわみ比を近くし、ねじり剛性を上げる努力が必要である。ただし、曲げ剛性を上げてねじり剛性も向上するとは限らない。たとえば、普通の5尺旋盤では中央に1000kgの荷重をかけると垂直変位  $24\mu$ 、水平変位  $68\mu$  あったものが、設計の改善で約半分になった<sup>20)</sup>。最近、切くず処理が問題になり、このために形状が従来の習慣的なものから変化することが多いが、剛性に注意がいる。

結合部の剛性が全体の剛性を支配することが多く、たとえばラジアルボール盤では、コラムの変形量の中に大きな割合を占めることがみられる。結合部の剛性を支配する事項として(a)ボルトの数と配置 (b)ボルトの締め付け力(プレロード) (c)接合面の面積とその配分 (d)フランジの厚さ (e)接合面のマクロ的の形状誤差 (f)表面あらさと中間介在物などがあげられる。フランジの強さをますために厚くすると、ボルト長さが長くなって引張側の伸び変形がまし、剛性を減じること<sup>22)</sup>、接合面の仕上り状態が剛性に関係していて、あらさがへたることによって変形量がますことに注意すべきである。結合部の変形を荷重と直線的な関係をもつ弾性変形状態にもってくるには、バイト仕上げでは接合面圧を  $3\text{ton/in}^2$  以上にしなければならないが、ボルトによってこれだけのプリロードを作ることは困難なときが多い<sup>32)33)</sup>。

## 熱膨張による変形

工作機械には多くの熱源がある。切削部分、駆動部分および油圧系、軸受などである。伝熱によって温度勾配を生じるときは曲げ、ねじりなどの変形を生じる。たとえば、鋼では長さ100mmが  $1^\circ\text{C}$  温度上昇するとのびは約  $1\mu$  になり、この影響はかなり大きく、時間経過に伴って変化することも困る。

構造部分の熱変形は熱源位置に油タンクを設け、油をいろんな温度にすることによって基礎的に研究できる。立フライス盤(2番程度)に主軸頭部、コラム内部、ニー内部の3つの熱源を考え、簡単な計算結果と実験とが割合一致することを報告<sup>21)</sup>したのもある。各部の膨張の影響が相殺される部分もあるので、熱源温度を  $20^\circ$  上昇させたとき、主軸先端の対テーブル上面垂直方向変位は  $-32\mu$  であったが、コラムだけ温度上昇するときには  $-181\mu$  にもなる。研削盤では、テーブルを油圧送りとするものが多く、要求工作精度がきびしいにも拘らず、熱変形の影響は大きい。図4は油タンクの方法で研究した



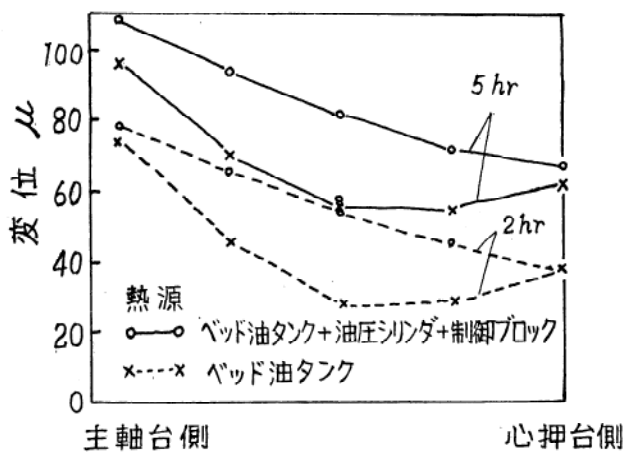


図4 平面研削盤ベットの熱変形の1例

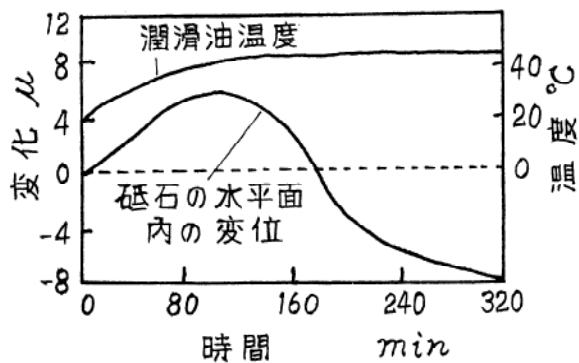


図5 砥石軸、軸受潤滑油の温度上昇の影響の例

結果の1例で<sup>34)</sup>、変形はかなり大きく、すべり面は垂直面内で中くぼみとなり、前方にたおれて前下りとなる。最近多く行われているように油圧源を外に出すと、この影響がやや改善される。研削盤の前面に太陽光線が当たると、油圧シリンダによるばあいとは逆に水平面内で後方にそる。ソ連の報告によると、2時間照射で約4.5 $\mu$ たわむが、シリンダ温度が上昇すると、この方の影響が大きいので、そりは逆になる(2 $\mu$ )。砥石主軸の軸受の温度上昇の影響も大きく(図5)、このために潤滑油を冷却することも考えられている。

旋盤主軸受の温度上昇の影響も同様で、ある8尺旋盤では800rpmで4時間運転したところ、垂直面内の変位は前部軸受で100 $\mu$ 、後部軸受で70 $\mu$ となり、都合30 $\mu$ 前上りとなった<sup>34)</sup>。立形小形ジグボーラでも、無負荷で1000回転で120分運転したら主軸先端が15 $\mu$ 変位したという報告もある。

### 振 動

工作機械は多くの部分より成るので、多くの強制振動源と固有振動数をもつ。静剛性のばあい問題となった固

定および運動結合部は減衰効果をもつので、静的変位に対する振巾の比(拡大率とよぶ)は1より小さくなることが多い。工作機械の主軸回転数変換範囲は広い(たとえば35~2500rpmというように)ので、この間に固有振動数の入ることは共振すなわちびびりをさけるためになるべくさげなければならない。実際に工具位置で振動スペクトルをとってみると、実に多くのピークが現われる。このピークが小さいものほど精度・性能の高い工作機械である。それでも、旋盤とかフライス盤の主軸性能を無負荷で試験したところ、世界的に優秀なものでも2~数の振巾をもつといわれる。上の振動スペクトルは考えうる振動源の回転数、あるいは固有振動数と対照することによって振動源をつきとめるに役立つ。

たとえば旋盤で問題となる固有振動数は (a)機械構造とくにベッド (b)主軸-加工物系 (c)工具系のものである。ベットのそれは普通5~20c/sが多く、特によいものでは50c/s位のものがある。かりに10c/sとすれば、600rpmでびびりを起す可能性がある。特に、形状、肉厚、リブなどを変化させてもその固有振動数を思うように計画的に変化できないところに悩みがある。最近では、びびりに関連して、主軸、軸受、チャック、加工物を一体とする主軸系の振動性能が問題となっており、加工物の寸法に応じて変化する<sup>17)</sup>。すでにのべたように、びびり現象の解析的研究も多くなった。

フライス盤のオーバーム内・中ぐりパーに防振装置(ダンパー)をもつものも作られている。また、ソ連ではバイトにダンパーをつけた工夫も二三みられる。

### 主 軸 受

主軸の静剛性と振動特性を改善するためには、軸受、軸の細長比などが問題になる。軸受では、軸受の種類、クリアランスの大きさ、配列と間隔、2点支持と3点支持、スラストをうける位置、駆動の方法とその位置、プリロード、潤滑法、外乱などが問題となる。3点支持は理屈の上ではよいが、組付け調整に困る。最近では軸受性能の向上により主軸長さを小さくするものが増している。軸受単体の性能試験では非常によい成績がえられるが、組付けられたものでは桁ちがいに悪くなることに注意する必要がある。

ころがり軸受は回転精度を十分満足させない。このために主軸受として、傾斜受金式、多面フィルム式、および静圧軸受を採用するものが増してきた。わが国でも砥石軸・旋盤主軸に応用するものがふえ、また空気静圧軸受をもつ高速内研ヘッドも作られている。主軸の拘束位置がますので回転精度が向上するのである。