

SME LIBRARY 19

日本の工作機械を築いた人々



谷口 紀男氏

前 東京理科大学 教授
山梨大学 名誉教授

SME 東京支部

本稿は大河出版「応用機械工学」1993年4月号掲載

山梨大学時代の活動

——日本の工作機械や生産技術分野で活躍された方々のお話をうかがうこのシリーズ、今回は山梨大学名誉教授で前・東京理科大学教授の谷口紀男先生です。

先生は改めてご紹介するまでもなく、日本の生産技術分野でさまざまな特殊加工技術や自動化システムを育て上げ、また精密工学会やこの SME（国際生産技術者協会）といった方面でも多大な貢献をされてきました。

そこで、これまでの先生の足跡をたどりながら、とくに戦後の日本の生産技術の歩みを振り返ってみたいと思います。

谷口 私は旧制第八高等学校（名古屋）の理科から、1932（昭和7）年に東京帝国大学の造兵学科に進んだのですが、高校時代は剣道をやっていまして、インターハイにも出場したことがあるんですよ。その頃3段を取っています。

造兵学科というのは、その名の通り兵器に関する工学を学ぶところで、私が入学したときの同期生は17名、その他に陸軍と海軍から1名ずつでした。当時の主任教授は青木保先生です。戦争の是非はともかく、当時は世界中が軍備増強を競っていた時代ですから、兵器工学はいわば先端技術だったのでしょ

うね。基礎学科としては、応用物理学を中心に機械工学や電気工学、さらに専門科目として、大砲や魚雷の設計、制御に関するものや、望遠鏡や測距儀のような光学機器、音響機器などでした。まあ、今でいえば精密工学に関するものだったのでしょうか。

ところが、大学3年のときに結核性肋膜炎を患って、そのために1年休学してしまったのです。その結果、卒業論文は歯車測定器の設計をやることになって、それがきっかけで私は、幸か不幸か精密機械の研究の道を歩むことになったわけです。本当にわからないものです。

さて、今度は大学を卒業しても軍需産業に働き口がないわけですよ。というのは、当時は胸の病気をした者は、健康上の理由からたいていの会社で採用されませんでしたからね。でも、なんとか「わかもと製薬」に就職することができました。あそこは、ビール酵母を基にした栄養剤の会社ですからね（笑）。それが1936（昭和11）年でした。

谷口 紀男 氏

1912（明治45）年5月生まれ。旧制第八高等学校から東京帝国大学工学部造兵学科に、1936（昭和11）年、卒業と同時に「わかもと製薬」に入社、技師として酵母製造プラントの建設に従事する。

1940（昭和15）年、山梨高等工業学校（後に山梨大学工学部）機械工学科教授に、戦後は山梨大学で精密工学科の設立などに尽力、1961（昭和36）年から2期にわたり工学部長を務める。1963（昭和38）年から理化学研究所主任研究員を兼任。1966（昭和41）年山梨大学を退官し、同研究所専任研究員として研究指導にあたり、1973（昭和48）年から1990（平成2）年まで東京理科大学理工学部機械工学科教授、山梨大学名誉教授、工学博士、技術士、CIRP 名誉会員、SME 正会員（元・東京支部長）。

精機学会（後に精密工学会）会長を始め、大河内記念会理事、精機学会（当時）自動組立委員長、大越記念会会長、学術振興会研究委員、光学工業研究組合部門委員長などの要職を歴任、我が国生産技術の発展に指導的な役割を果たした。

とくに硬脆材料の加工に関して、電子ビーム、マイクロ波、レーザ、超音波などを利用した特殊加工、さらに超精密加工、自動組立システムといった先端生産技術の分野で我が国の先駆者となったことはよく知られている。

研究成果は数多く、精機学会賞、大河内記念技術賞、科学技術功労賞、精密工学会連沼賞などの他、長年の貢献によって紫綬褒章、勲三等旭日勲章を授与されている。

現在は、イギリス・オックスフォード大学出版局からの依頼で英語版「ナノ・テクノロジー」を執筆中。

趣味はカメラと散策。

わかもと製薬には3、4年おりましたかな。それで、酵母の製造システムをつくるプロジェクトに参加することになりました。最初は気楽に考えていたのですが、大変な仕事になりましたね。というのは、そのうちにヨーロッパで戦争が始まり、ドイツから酵母が入ってこなくなったからです。

そこで、酵母を自社生産するために酵母培養工場を建設することになり、私は化学工学などの勉強もせざるを得ませんでした。でも、今になって考えれば、若くまだ経験もない私に、よくあれだけの仕事をさせてくれたと思います。

そのうち身体のほうも自信が付いてきた頃に、全国のいくつかの高等工業学校で学科の増設が進み、青木教授の推薦で私にも教官にならないかという話が飛び込んできたのです。それで、甲府に行くか長

岡に行くかということになったのですが、医者に相談したらやはり冬寒い長岡は止めておけといわれました。

そんな事情で、1940（昭和15）年の3月、山梨高等工業学校（後に山梨大学工学部）に教授として就職することになったわけです。しかし、その後に太平洋戦争が始まり、戦時中にご承知の通りいろいろなことで振り回されました。

甲府はあんな内陸部ですから、空襲は受けずに済むと思っていたら、1945（昭和20）年の7月でしたか、学校の校舎も研究室もすべて焼けてしまいました。それで戦後すぐは、バラックの校舎で授業をしたものです。

そんな状態ですから、これからどんな研究を始めたらいいかということになり、私は大学では大越 諄先生（東京大学教授、理化学研究所主任研究員、機械試験所所長、いずれも当時）の研究室におりましたので、先生などとも相談して、やはり加工関係をと考えていました。

ただ、研究というのは抽象的なものよりは切削加工のような具体的なもののほうがデータは出しやすいわけです。そこで、皆“地に着いた研究を”ということで、大越先生が金属の切削加工でしたから、仲間の小林昭さん（元・埼玉大学教授、前・茨城職業訓練短期大学校長）や私、それに今中治さん（元・金沢大学教授、群馬職業訓練短期大学校長）などは、他の材料の加工をやろうじゃないかということになりましたね、小林さんはプラスチック、今中さんはガラス、私は甲府にいた関係から水晶など硬くて脆い材料、いわゆる「硬脆材料」の加工を始めたわけです。

この硬脆材料という言葉は私が命名したのですが、まあ、いってみればこれがその後の私の研究のスタートになったのです。硬脆材料は今でも興味があるのですが、いろいろ調べてみると金属とは全然違う性質がある。

結局、私はこの硬脆材料の加工法で1957（昭和32）年に学位を取ったのですが、つまり硬脆材料というのは普通の切削方法では駄目で、どうしても脆性破壊を利用しなければならないのです。

私は最初、脆性破壊の研究から始めましてね、マクロとミクロでは脆性破壊がまったく違う。マクロ加工でやると割れますが、どんどんミクロにして切込みが $1\mu\text{m}$ 以下になると、脆性破壊が起こらなく

なるのです。それが、今話題になっている「ダクタイル・グライディング」という考えかたの基です。

切削深さが $1\mu\text{m}$ 以下になると、ガラスなどの硬脆材料はいわば切削加工ができ、それが数 μm 以上だと脆性破壊になってしまうわけです、

その後、硬脆材料加工の延長として超音波加工などを手がけたのですが、この加工法は私たちが最初ではなかったでしょうか。最初の頃は、超音波加工は水中のキャビテーションを利用した加工法だといわれていたのですが、よく調べてみるとキャビテーションは加工の本質ではないんですよ。

アメリカに「キャビトロン」という名前の超音波加工装置メーカーがありましたけれど……。

超音波加工は、砥粒を使って脆性破壊を起こさせ、キャビテーションによって加工屑を除去しているのです。ですから、油中で加工するとキャビテーションは起こらないので、加工能率は非常に悪いですね。

硬脆材料を加工するには、従来の切削加工の他にもいろいろあるのです。硬脆材料は、金属などに比べて強度や硬度がはるかに高い。ですから、ダクタイル・グライディングにしても、砥粒の先端に働く単位あたり応力は非常に大きくて、普通の加工法では駄目なのです。

実は我々もずいぶん失敗しましてね。ミラーカッティング（鏡面加工）をやろうと、SiC（炭化硅素）やアルミナを鋭く研いで、それを工具にして加工を試みましたが、すぐに刃先が参ってしまうのです。やはり、ダイヤモンドでないと鏡面加工はできません。

一方、セラミックスについて、電子ビーム加工やレーザ加工、超音波加工などの研究を始めて、特許もかなり取ったんですよ。でも正直な話、超音波加工以外はあまり金になる特許はありませんでしたね（笑）。

これは余談ですが、その後の超音波加工に関するアメリカとの特許戦争では、私の特許も防衛に役買ったこともありましたが、ある超音波加工関連の私の特許が、アメリカが日本で申請したのとはほとんど同じなので、特許庁にかけあつて門前払いにしたとかね。

ところが、それで問題が起こりましてね。というのは、日本のあるメーカーが、すでにそのアメリカの技術を買ってしまっていたのです。それで私のところにさんざん電話をかけてきて、お前の主張を引

き下げろという。何しろ先方は、大変なお金を払っているわけですからね。結局、喧嘩別れになってしまいましたけれど……。

でも、日本のメーカーさんは私の特許になかなか金を払ってくれませんでしたね（笑）。実際に使用料を払って私の特許を使ってくれたのは、島田理化学工業と東北金属（現・トーキン）くらいです。

——谷口先生は、技術士制度試験の合格第一号とかがっていますが……。

谷口 はい、それには少し事情がありましてね、1955（昭和30）年頃だったと思いますが、超音波加工に関連して日本タイプという会社の依頼で、朝日新聞の活字をつくる話から油圧制御の自動活字鑄造機を開発することになり、1分間に120字という高速の活字鑄造に成功したわけです。

日本タイプは、結局この技術で精機学会（当時）の明石賞を受賞したのですが、これがきっかけになって私は、最初の技術士国家試験を受けるよう勧められたというわけです。その後、いろいろなところからコンサルティングを頼まれるようになりましたが、まあこれが情報機器に関連した仕事の最初だったといえます。

その後、1960（昭和35）年に山梨大学に精密工学科を設立することになり、その準備として文部省から当時の金額で100万円頂戴して、在外研究員として少なくとも3か月以上、海外留学するよういわれたのです。

それについていろいろな方々に相談したのですが、研究するといっても私もそう若いわけではないし（笑）、1年ばかりどこかの大学に所属しても研究設備が貰えるわけでもない。そこで結局、海外の精密工学や生産技術事情を見てくることになり、アメリカとヨーロッパを4か月近く回ってきました。

そのときに私は初めて、SMEの会員になったのです。というのは、竹山秀彦さん（神奈川工科大学教授、当時・機械試験所）から、アメリカに行くんだったらSMEに入っておいたほうがいいとアドバイスされましたね。それで、竹山さんの紹介でディアボーン（ミシガン州）のSME本部を訪ねたりしました。

——その欧米視察では、民間企業もずいぶんご覧になったのでしょうか。

谷口 はい、アメリカではIBM、RCA、コダックなどです。IBM社ではコンピュータ製造ラインに目を見

張り、RCAのエレクトロニクス、コダック社のレンズ研磨工場など、当時の日本とは桁違いの規模と技術水準に本当に驚いたものでした。

そのときに私が最も印象的だったのは、トランジスタの生産です。私が渡米した頃は、日本では“トランジスタガール”という言葉が世相を反映して、コンベアラインに若い女子工員がずらりと並んで、人海戦術でトランジスタを組み立てていたものでした。

当時、そのようにして低賃金でトランジスタを生産していた日本に脅威を感じたアメリカが、それによいように対抗したかといえ、トランジスタの自動組立です。アメリカは、トランジスタの生産コストで日本に勝つには自動組立しかないと考えたわけです。

そして同時に、時計などトランジスタ以外の製品についても、自動化でコストダウンをはかっていく必要性を、アメリカは真剣に検討したことでしょう。私はそのときにアメリカ内のいろいろな工場を見て回りましたが、当時のハミルトンやブローヴァなどの時計メーカーでも、自動化問題は深刻だったと思います。

たとえば時計部品にしても、日本では当時、ルビーの受（軸受）に0.08mmの穴をあけるのに、ピアノ線にダイヤモンド粉を付けたものを工具にして、専用機を30台くらい並べて5000～6000rpmで回してやるんです。それでも、1台あたり個穴をあけるのに20分くらいかかる。

そのラインには女子工員が1人付いていて、穴があくとその箇所のランプが点灯するので、女の子が工具を交換してまた加工を始めるという具合です。つまり、ライン全体では1分に1個程度の受の加工ができるというわけです。

私は、その頃すでに超音波加工をやっていたものですから、当時の諏訪精工舎、現在のセイコーエプソンに、我々の開発した加工技術を持ち込んだことがあるのです。それは、ダイヤモンドの代わりにSiCを使った超音波加工法で、同じ0.08mmの穴を1分くらいであけてしまうものです。

それであるとき、諏訪精工舎の松木専務にこの技術売り込んだら非常に乗り気で、すぐに現場の責任者を呼んでいろいろ協議していましたが、結論としては不採用になったのです。というのは、1分1個という生産性なら今でも実現しているわけで、そ

れに私の技術を使うとなると、機械1台ごとに作業者を付けなければならず、逆にコストアップになるというのです。

それじゃどうすればいいかという、工具と加工物を自動交換するようにすればいいという。しかし、実際に太さ0.08mmの工具をどのようにしてチャッキングすればいいのか、実はこれは大変なことなんですよ。

私はそのとき、なるほど自分たちはこれまで加工のことばかり考えてきたけれども、今後はシステムとして加工を考えないと駄目だと感じました。それが1960年代の中頃だったのでしょうか。

私がその後、加工システムとその自動化を積極的に進めていこうと、自動組立機を始めとする自動化やシステム化といった問題に傾倒していったのは、実はこれがきっかけだったといっても過言ではないと思います。さっきいいましたように、アメリカは1960年頃から自動化には非常に熱心でしたからね。

そもそも自動化というのは、日本の低コスト生産に対抗してアメリカで始まったものなのですが、皮肉なことに現在では、そのお株を日本が奪ってしまったというわけです。半導体生産やロボットにしても、最終的には日本で完成させた自動化技術が基なのです。でも、それが現在の過剰生産による不況につながっているような気がします……。

——お話のように自動化はアメリカから始まったわけですが、アメリカが目指した自動化と日本が現在実現している自動化とは、ややニュアンスが違っているのでしょうか。

谷口 たとえば時計産業の場合、1960年代から日本は世界的水準に達するわけですが、時計の軸の加工精度はそれまでは0.01mm程度で、それを現場で選別組立していたのです。これはスイスでも同じことです。しかし、日本では現場で選別組立をしていては、とてもスイスの時計にかなわないと考えました。

そこで、量産で精巧な国産時計をつくるには、部品精度を限界ゲージ方式できちんと管理しなければ駄目だということになり、時計メーカー各社は図面寸法をすべて μm 単位に直してしまったのです。たとえば、0.1mmは100 μm というふうにな。そして、工作機械の加工精度も $\pm 5\mu\text{m}$ 以内になるように、スイス製の機械を社内で調整し直したのです。

このようにして国内の時計メーカーは、軸穴間隔精度 $\pm 5\mu\text{m}$ を実現するために非常な努力を重ねた

と思います。それが1963年頃だったのでしょうか。それで当時第二精工舎（後にセイコー電子工業）の遠峰^{とよみね}律さん（元・オリエント時計社長）たちは、目標とする生産量を達成するには、スイスタイプの単軸自動盤が最低150台は必要だと考えて、直接スイスに乗り込んで2年以内に150台どうしても納入してほしいと直談判したのです。

しかし、先方は10台や20台ならなんとかなるが、150台はとても無理だという。それではどうしても間に合わないで、トルノスやピーターマンといったスイスのメーカーに、同じ自動盤を日本で国産化してもいいかどうか聞いたところ、向こうはつくれるものならつくってみろといわんばかりだったそうです。

帰国すると遠峰さんはすぐに、ある精密工作機械メーカーに、スイスの機械と同じものを試作してくれるよう頼んだのです。そのメーカーは最初に5、6台つくってみたのですが、それなりの精度がちゃんと出ている。

これはいいというので、計画通り量産してラインに入れたところが、半年もしないうちに精度が落ちてしまったというのです。しかし、どうしてそんなに早く精度が落ちたのかさっぱりわからない。そこで、改めてトルノス社の自動盤を徹底的に調べ上げ、ほとんど同じように作り上げたのですが、その会社の技術力は大したもの、結果的には精度5 μm の自動盤を完成させてしまったのです。

この機械は、性能が良かったためかその後よく売れて、結局、その会社の経営状態を建て直すまでに貢献したということです。

——精密工作機械と一般の工作機械とでは、確かに作りかたが違うのでしょうか。

谷口 時計の自動組立に関して、印象深い話がありましてね。私が海外視察の後半にヨーロッパに渡り、フランスのブザンソンにある有名な時計メーカー、LIP社を訪ねたときのことなのですが、その社長は腕時計の自動組立を熱心に主張していました。

そして彼が、アメリカの電子部品の自動組立と違い、部品の加工精度は $\pm 5\mu\text{m}$ 以下でないと自動組立は不可能だ。だから、自分のところは加工精度を高める努力をしているのだと強調していたのが印象的でした。

というのは、1975年頃に第二精工舎や諏訪精工舎などが腕時計の自動組立ラインを完成させ、それま

で不可能だといわれていた無調整組立も実現してしまったからです。その意味で、LIP 社の社長の予測は正しかったわけですよ。もっとも、LIP 社長自身は時計の自動組立に成功しませんでした。

組立の自動化という点では、やはりそのときにオランダのフィリップス社が真空管を、またドイツのシーメンス社がリレーの自動組立を行なっていたから、当時は日本よりもヨーロッパのほうが自動化が進んでいたわけですよ。

日本は、ビデオ機器の生産では世界一になりましたが、その心臓部であるビデオシリンダの加工機についても、面白いエピソードがあるんですよ。*

あのシリンダは、表面粗さなども μm オーダで加工するため、ダイヤモンド工具を使って旋削するのが普通です。それで、ビデオの開発を始めたばかりの松下電器の技術者が、日本中の工作機械メーカーにその機械の開発を依頼したところ、それに応じてくれる会社が 1 社もなかったという話です。

そこで、その担当者はスイスの山奥まで探し回り、ようやくヴィエンヌという小さな町のクンマ社という、自動盤や時計部品の自動機のメーカーを見つけたのです。クンマ社の社長は叩き上げの人で、よし、やってみましょうということになり、同社の自動盤をビデオシリンダ加工専用機に改造する仕事を引き受けてくれることになったというのです（写真 1）。

私も 1970 年代の後半に、実際にクンマ社を見学したことがあるのですが、その機械はすべてカム制御で、NC なんかもまったく使っていない。それにクンマ社長は、自分で図面を引いて機械をつくるという生粋の職人で、NC 機ではどうしても精度が出ないという持論を持っている人なのです。

NC 機はあくまでも荒加工用で、仕上げはカム式の機械でやるというのです。しかも、日本向けの機械

の部品を加工するのに、使っている NC 機械はアメリカ製なんですよ（笑）。

松下電器は、そうして完成した専用機を使い、子会社のビクターが開発した VHS 方式のビデオの量産に成功したわけです。一方、ソニーや東芝はベータ方式を、日立製作所は半年で VHS 方式のビデオを開発しましたよ。

その当時は、クンマの機械を何台入れるかでビデオの生産性が決まったものでした。今では、日本でもたとえば新潟のタカハシカイとか理研製鋼とか、ビデオシリンダ加工機をつくるところがありますけれど。

もちろん、ベータ方式のビデオシリンダもクンマの機械で加工しているのですが、部品点数の違いから VHS よりも組立コストがかかり、それに何といっても録画時間の短さが災いしたようですね。画質の点でも良い方式なのですけどね。

ただ、VHS の録画時間が長いことも偶然の産物で、ベータよりもヘッド間ピッチを粗く取っていたために、アメリカで長時間録画の要求が出たときにすぐに対応できたというのです。ところがベータ方式は、最初からピッチを詰めていたために、それを解決できなかったそうです。

ナノ・テクノロジーを提唱

——先生が超音波加工や電子ビーム加工、イオンビーム加工などを手がけられるようになったお話はいかがいたいですね。

谷口 私がこの方面の研究を始めたのは山梨大学時代ですから、もう 30 年以上も前のことです。さっき

いいましたように、戦後はゼロからのスタートでし

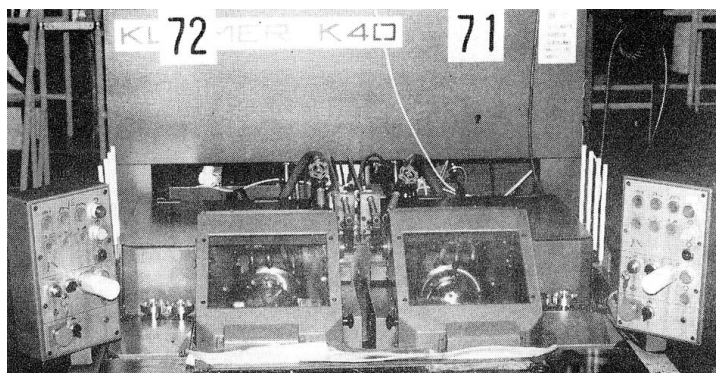
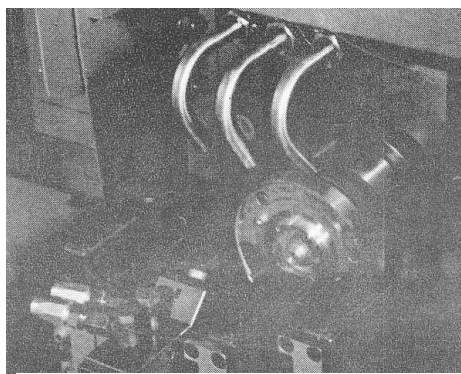


写真1 クンマ「K40」の楕円形刃物台(左)と、加工ラインで稼働中の同機。基本性能は、主軸回転精度 $0.6\mu\text{m}$ 、寸法位置決め精度 $1\mu\text{m}$ 、スライドテーブルの真直性 $0.6\mu\text{m}$

は機械屋ですが、電源やら電気関係のものまで全部自分たちでこしらえたものです。ただ、一部の設計は電気科の学生に手伝ってもらったりはしましたが……。

あるとき学生に超音波発振器の設計をさせたら、実に基礎的な理論図だけを描いてきたり、装置が空中に浮いていて、まるで使いものにならないようなものを描いているのです。これはどうも教育を間違えたようだと大笑いしたこともありました。

1966（昭和41）年に理化学研究所に転出するまで26年間、私は甲府で過ごしたわけです。つまり、自分の教育研究の初期の大部分を山梨大学で送ったわけで、今になってみれば十分な理解もないままに多くの学生に講義した部分もありますが、私としてはそれなりに努力はしたつもりです。

1963（昭和38）年でしたか、東大の大越先生が理化学研究所の主任研究員を定年退職されることになり、その後任にというお話が先生からあったのですが、その2年前から山梨大学の工学部長をしていたものですから、当面は土曜日だけの出向にしてもらい、1966年から正式に理化学研究所に勤務するようになったのです。

ここでの主な仕事は研究員の指導でしたが、ひとつには旧大越研究室があまり大所帯になり過ぎたので、その整理もありましたね。そこで、若い研究員には学位論文をまとめさせ、むしろ外部の研究機関に活躍の場を与えるよう指導しました。

この理化学研究所からは、佐田登志夫先生（元・東京大学教授）や篠崎譲先生（元・職業訓練大学教授）、吉川弘之先生（東京大学教授）、笠原英志先

生（東洋大学教授）、宮崎俊行先生（千葉工業大学教授）など、多くのすぐれた研究者が育っています。

まあそんなわけで、超音波加工や電子ビーム加工に手を広げていったのですが、それはどうしても従来の機械加工では限界があるのに気が付き始めたからです。それが、私が提唱した「ナノ・テクノロジー」の発想になっているのです。

つまり、微小なものを加工しようとする、加工部先端の単位面積あたりエネルギーは非常に大きくなります。これが分子、原子レベルになると、その原子結合力を切るには理論的にきわめて大きな力が必要になってくるのです。

我々も若い頃は、切削加工でそれを実現しようとして、工具先端を非常に鋭利にすればできるだろうと考えたのですが、あっという間に刃先が駄目になるので、さっきいったような鏡面加工は未だにダイヤモンド工具を使っているのです。そのダイヤモンドも、アルミナのような材料だと切削距離はせいぜい3 km程度で、それ以上になると減ってしまいます。

そんなことから、工具は摩耗することのないイオンや電子ビームによる加工法の研究を始めたわけです。ただ、イオンビーム加工などの場合、切削工具と違って位置決めが難しい。しかも、イオンが当たった位置や加工量を確認できないのです。

オングストローム単位の分解能を持つ、工具としての測定器が最近までなかったのが、フィードバックもかけられず困っていたのですが、ようやくSTM（走査トンネル顕微鏡）を使ってそれが可能になったのです。

この方法は、細いタングステン線のピンの先端を

（6ページの注＊）

ビデオ用シリンダに要求される精度は、形状精度（真円度、真直度、表面粗さなど）、寸法精度ともサブ μm に近い。信号記録用ヘッドを組み込む回転シリンダはもちろん、とくに「リード」と呼ぶ、ビデオテープを支える固定下シリンダ外周面に、テープを斜めに走らせる溝（ガイド）を高精度で量産加工できるかどうか、VTRの将来を決定する大きな鍵となった。

日本のVTR開発は、1960年頃から主にテレビ放送用機材としてスタートした。当初、松下電器は国産の汎用旋盤を改造した専用機でそれに対応していたが、加工精度はベテラン技能者の腕に頼らざるを得ず、量産効率は良くなかった。

そこで、当時世界的な精密カムサイクル自動盤メーカーだったスイスのクンマ社に働きかけ、同社の「K40」自動盤をベースに松下のツーリング技術（取付精度の高いホルダやダイヤモンド工具）を始め、マスターカムの解析技術、ロボットによる自動化、冷却方法などを組み合わせ、世界初のリード加工専用機を完成させた。

同機はマスターカム倣い方式だが、このカムを理論直線（ $\pm 1\mu\text{m}$ ）に仕上げる必要から、マスターカムを何回もラッピングしながら、それに近づけていった。しかし、当時の計測機器の保証分解能では評価の方法がなく、最終的にテープに記録された信号のアジマス角度を直接チェックすることで確認したという。これが後に、各社の家庭用VTRの生産能力はK40の台数で決まるといわしめた、名機の誕生にまつわるエピソードである。

使い、加工物との距離を 1nm 程度にして、その間に 5V くらいの電圧をかけ、先端付近に非常に大きな電界をつくって、電荷を帯びた物質を引っ張り出すものです。これを「エレクトリック・フィールド・エヴァポレーション（電界蒸発加工）」と呼んでいます。加工物を原子、分子単位でつまみ出すわけです。このピンの位置はどうして決まるかというと、ピエゾ・スタック（電歪素子）という方法を使い、距離を調整してサブ nm レベルで制御するわけです。測定にはレーザ光を使い、原子配列通りに原子をつまんだり、置いたりできるというものです。「アトミック・ビット」という言葉を使っていますが、ある人は原子レベルの加工という意味で「アトミック・クラフト」と呼んだりしていますね。

ここで誤解のないように説明しておきたいのですが、私が 1974 年に初めて「ナノ・テクノロジー」を提唱したのは、加工精度が nm オーダということで、加工寸法の大きさを表現しているわけではないのです。超精密加工がいわれ出したときに、加工精度が $10\mu\text{m}$ でも $5\mu\text{m}$ でも同じように“超精密加工”と呼んで、かなりいい加減だったので（笑）、それでは最終目標を nm くらいにしようじゃないかとね。

しかし、この言葉はアメリカあたりからそんなことは不可能だ、とだいぶ批判されましたよ。ですから私は、イオンビームを使えば一応それが達成できると反論しました。

ただ、問題は本当に nm 削ったかどうかかわからないことです。そんなこともありました。でも西暦 2000 年頃になれば、本当に“ナノ・マニシング”の時代に入っていくのではないのでしょうか（図 1）。

その後 10 年以上経ってからだったでしょうか、イギリス・クランフィールド工科大学のパット・マッキューン教授が、ナノ・テクノロジーについて CIRP（国際生産技術者会議）で講演をしるという。彼は測定屋ですが、私が下手な英語でしゃべっても聞く人は理解できないだろうからと（笑）、彼が私の論文の要旨を発表してくれたのです。それからですよ、ナノ・テクノロジーという言葉が急に広まったのは。

加工精度を nm オーダにするには、分解能はサブ nm でなければならない。これはつまり、微小なものでも加工できるという意味なのですが、単位面積あたりの加工入力密度を 10^4 J/cm^2 程度まで高めないと、原子間力を切ることはできません。

こうなると切削では実際上無理で、せいぜいがダイヤモンド工具によるものでしょう。ただし、工具の送りマークは残ってしまいます。

最近、セラミックスをダイヤモンドホイールで研削することで、nm オーダの加工精度を実現する方法が提案されていますが、これにはまず工作機械がまったく振動のない完全なものでなければ駄目です。つまり、砥石のほうはドレッシングさえ完璧なら問題ないのですが、機械の回転軸には振れがあってはなりません。

シングルポイント（単刃）のダイヤモンドバイトを使ってアルミを鏡面加工する場合は、多少の振れがあっても、同じ刃先がほぼ同じ場所を繰り返し通るので問題ないのです。

しかし、ミラー・グラインディング（鏡面研削）となると、砥粒の配置や結晶の向きはランダムだし、実際には不可能だといっているのです。だから、研削の場合は「ミラーライク（鏡面に近い）……」じゃないかと（笑）。

ポリシングなら鏡面加工ができます。焼入鋼には酸化クロムや二酸化鉄などの軟らかい砥粒を使い、ガラスには酸化セリウムを使います。これらの物質は溶融点は逆に高いので、いわばバニシングのような加工ができるのです。ですから、軟らかくて耐熱性のある砥粒を使えばいいんですよ。

とくにポリシングは高温なので、機械加工の他にどうも化学的な作用も加わっているようです。たとえば、酸化クロムで鉄をポリシングしても良いのですが、ガラスには向かないので、その場合は酸化セリウムを使います。

——ポリシングという加工方法も、実際にはなかなか難しいようですね。

谷口 先の海外視察で、アメリカのコダック社を見学して驚いたことがありました。というのは、当時、日本ではガラスレンズは 20～30 分かけてポリシングして仕上げていたのです。ところがコダックでは、これが数分で済んでしまっている。つまり、日本ではレンズの球面精度をポリシングで出していたのです。酸化セリウムを使ってポリシングして、ときどきゲージで測定するという方法なのです。だから、加工速度がきわめて遅い。

それに対してコダックでは、前工程で粒径 $1\mu\text{m}$ 以下のアランダム・パウダーを使い、表面精度 $1\mu\text{m}$ 、寸法精度が数 μm までラップ加工してしまうのです。

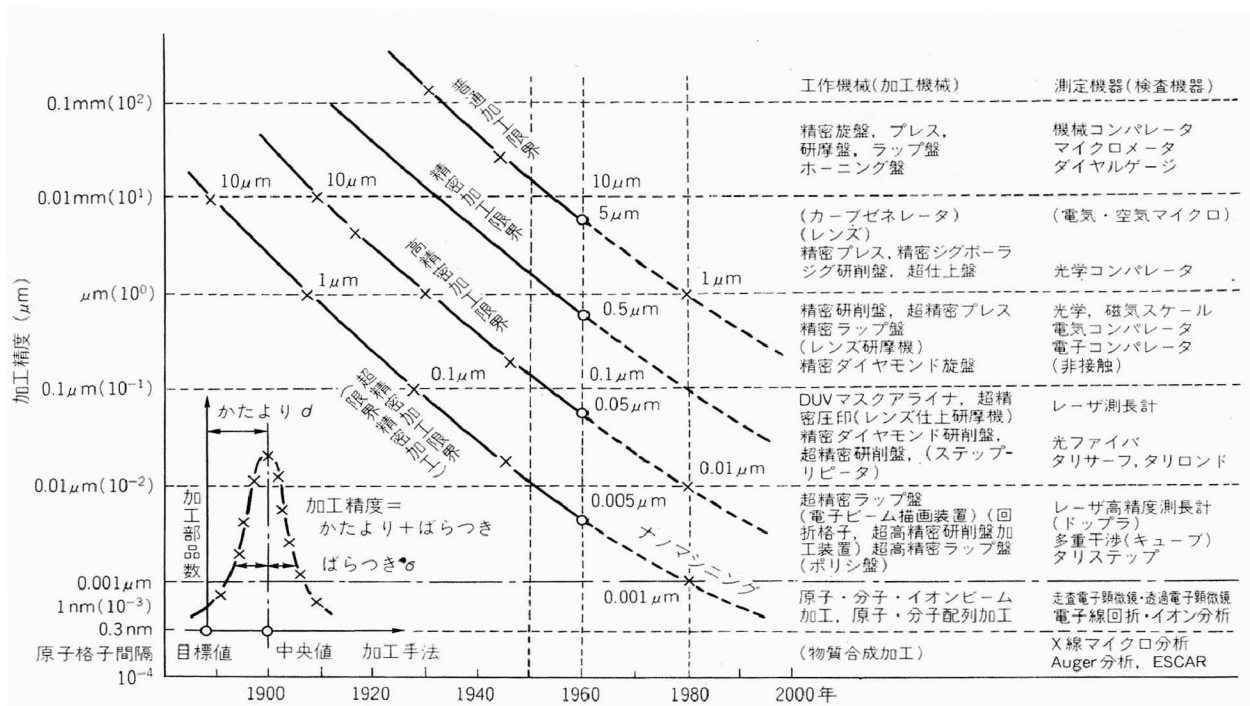


図1 到達加工精度と年代

これを「スーミング工程」といいませんが、これをきちんとやっている。その後、ポリシング工程で最終仕上げをしていたのです。最近では日本では、スーミング工程にはパウダーの代わりにダイヤモンドペレットを使っています。そのコダックの方法を見てから私は、レンズ加工関連の企業に手紙を出して、アメリカではこんな方法でガラスレンズを磨いていると、このシステムを紹介しました。

それを最初に使ってくれたのが旭光学工業です。当時の旭光学には、古い職人さんがあまりいなかったのが幸いして、新しい技術をズに受け入れてくれたのですが、他の大手メーカーの場合は、逆にベテラン技能者が多かったためか、そのシステムを拒否する空気が強く、結果的にレンズ加工の近代化に遅れてしまったというわけです。

もっとも、そうしたメーカーでも世代が代わると、ようやくコダック方式のレンズ加工システムを採用するようになりましたけれど。

やはりアメリカ視察でのことですが、デトロイトからバスで北に1時間ほどのフリントという町に、ゼネラル・モーターズ（GM）社の工科大学があります。いわば企業内大学です。そしてそのなかに、「コーオペレーティブ・コース」というのがある。

私はこれに大変興味を持ちましてね、このコース

私はこれに大変興味を持ちましてね、このコースは高校を卒業してGMに入社した者のうち希望者に半年は現場、半年は学校という教育を4年間やらせるわけです。全寮制で、本人の金銭的な負担はまったくありません。その代わり、夏休みも何もないんですよ。

そして、ここを卒業すればちゃんと大学出の資格が貰え、さらに修士や博士課程もあります。もちろん、金はGMが出しているのですが、フォード社はそれをやっていません。

私はこの制度を知ってから、日本に帰って文部省や経団連にも話したのですが、ぜんぜん取り合ってくれませんでしたよ。皆やる気がないのです。また、学校の先生方にしても、よけいな仕事が増えるだけですからね。

私が大学教育で感じたことは、アメリカと日本とは、まったくそのシステムが違うということです。アメリカは戦後、日本の大学に教養課程、いわゆる一般教育制度を押し付けておきながら、自分の国ではそれをしないんですよ。

当時でもあらでは、大学に入るとまずコンピュータです。1年生からその使いかたを教えるのです。そして3、4年生になると経営学などを教え、まず一般教育はやらないのです。

日本でも一時期、とくに理科系大学の一般教育制度に関する批判が出て、高校の蒸返し授業は止めようという意見が出たことがありました。そもそも、今の大学の一般教育制度というのは、戦後新しい教育制度になって、廃止された旧制高校や専門下校の教官を救済するためのものだったのかもしれませんが。

最近になってまた一般教育が見直されて、私もその必要性は認めますが、問題はその方法なのです。専門課程が2, 3年間だけというのは明らかにやりにくいですよ。私も山梨大学時代に教務委員などをやらされて、カリキュラムや単位を決めたりすることをしましたが、語学始め経済学や社会学など、一般教育は4年間で一貫して行ない、専門基礎科目も1年生から履修するようにしました。

文科系の大学では、実際に一般教育が中心になって動いていますから、一般教育の扱いは理科系とは同列にはできないでしょうが、理科系大学は少し違う。やはり、物理学や数学、化学などを重視してしっかりと基礎を学んでおかないと、それから先には進めないんですよ。

しかし、ドイツの大学教育は日本とはだいぶ違うのです。たとえばアーヘン工科大学では、1年生になると同時に設計も始めるのです。そして、3, 4年生になってむしろ基礎的科目を履修しているのです。

1, 2年生では、教室に引張り試験機を持ち込んで、強度の概念を直観的に教えたりします。ところが日本では、それを紙と鉛筆だけでやるものだから、学生のほうもあまりピンとこない。

ドイツでは、半期の履修課程を「ゼメスタ」という単位で呼んでいますが、たとえば6ゼメスタ以上履修すれば、もう大学を卒業してもいい。ただし、ゼメスタの数によって就職時の給料は違ってきます。つまり、ドイツの大学教育は最低で3年間、そしてそれ以上になっても差し支えないのです。

博士論文にしても、日本と違って非常に現場的というか実践的なものが多いんですよ。こんなことをいうと語弊があるかもしれませんが、日本の大学ですとNC(数値制御)のプログラムに関する論文を出しているながら、旋盤加工ひとつ満足にできないものいるわけです(笑)。

ドイツではシュツットガルト工科大学のバーネッカー教授の例をよく知っていますが、彼の研究室の学生たちは、民間企業とタイアップして自動組立な

ど工業の自動化やシステム化を請け負い、それがそのまま学生の博士論文になるというわけです。

そして、コンピュータを駆使してシミュレーションしたりしてシステム設計をする。これは学生にとっても良い経験になり、企業にとっても有意義な実験ができるというわけです。このようにドイツでは、企業と大学がうまく結び付いているんですよ。

ところが、学生運動が激しかった一昔前の日本だと、下手に企業から研究資金を貰うと一騒動ありましたから、良い意味での産学共同の機運は芽生えませんでした。そこで、大学はアカデミックな研究だけを追いかけ、企業側も良い人材を集めるだけという傾向になってしまったのです。

私の友人が日本を代表する重工業メーカーにいましたが、彼は何かテーマがあると、自分の会社、大学、それに公的な研究機関で、それぞれ同じプロジェクトを並行してやらせるのです。そして、ときどき合同でディスカッションをしながら進めていくとうまくいくという。ある研究をする場合、この方法はなかなか効果的で良いということでした。

——谷口先生は、精機学会(当時)会長を始め、自動組立委員会をつくられたり、自動化システム関連でも尽力されましたね。

谷口 私の特機学会活動はずいぶん長いのですが、当時の精機学会(現・精密工学会)で私が最も力を入れたのが、それまでの東大の精密工学出身中心の運営体制をなくすことでした。しかし、これにはだいぶ抵抗がありましたね。「放電加工研究会」などができたのはそのためだったのです。

いずれにしても、東大の精密工学のグループだけで精機学会の活動をしてもしようがないと、なるべく東大の人は多くは入れないようにして(笑)、全国からバラエティに富んだ人材を集めようと呼びかけたわけですよ。そうしないと、絶対に学会は伸びませんからね。それで私はずいぶん恨まれたと思います。そのようにして現在の精密工学会があるのですが、これからもさらに発展してもらいたいですね。

まあこのように見てくると、私のやった仕事というのは、まず硬脆材料の加工を中心にそれをシステム展開して、それらに横から枝葉を伸ばして広がったのが、自動組立システムなどでしょうか。私は別に自動組立の専門家でも何でもないので、とにかく当時は誰も手を付けなかったのです。

当時、私が今後の産業技術は自動化システムを構

築していかなければと主張しても、それに耳を傾ける人は少なかったですね。極端に言えば現場の人たちも、コンベアラインに人間を配置して、それが自動化だと思っていた時代ですから。

それが今では、世界の自動組立機の最先端にあるのが、あのコンピュータチップのワイヤボンダです。あの接着速度を達成するには、相当の努力をしているんですよ。サーボを使って位置決めとボンディングをしています。あの機械も、最後は職人さんの調整で組み上がるわけですけどね。つまり、現在のセンサやサーボアクチュエータ、それにコンピュータを駆使した自動化ラインでも不可能な仕事なのです。

以前、通産省のロボットの生産統計にはワイヤボンダが含まれていまして、それでアメリカが怒ったことがありました。確かに、自動的に位置決めしてワイヤをつなぐのだから、これはロボットだと通産省は考えたのでしょうか（笑）。今はちゃんと定義ができましたから、あんな統計はなくなりましたが。——最近、主にどんなことをなさっているんですか。

谷口 現在、オックスフォード大学出版局から出す英文の「ナノ・テクノロジー」のために原稿を集めたり、準備に追われています。最初は私1人で執筆するつもりだったのですが、時間的にも大変ですからね。これまでは、日本は世界から情報を貰うだけでしたから、そろそろ日本が情報の発信基地にならなければと引き受けることにしました。

今後の日本の生産技術について

——先ほどのクンマ社の話にも出てきましたが、NCではまだ完全な加工精度を達成できないということですが、今でもそうお考えですか。また、現在の日本の工作機械技術についてどのように思われますか。

谷口 日本の工作機械メーカーで、きちんとキサゲをして機械をつくっているのは、たとえば安田工業とか数えるほどでしょうね。だから、こんなことをいうと叱られそうですが、直線運動転がり軸受などをガイドにしている工作機械は、加工精度が $\pm 10\mu\text{m}$ もあれば良いほうでしょう。

しかし、安田の機械は $\pm 5\mu\text{m}$ で、ドイツもその精度を狙っているのですが、日本と同じで直線運動ボールローラを使おうとしています。そこで一番問題

になるのが、直線運動ボールローラのガタと減衰性です。回転軸ならいいのですが、直線ガイドだと起動停止するために減衰性能が最も重要になるのです。

このことはドイツでも問題になっていて、この減衰性能をどうにかして上げないと、工作機械には使えないといっています。しかし、日本の大学の先生方は難しいとみえてなかなか研究してくれないのです（笑）。

たとえば国産のステッパ（半導体露光装置）は、位置決め精度は $0.1\mu\text{m}$ 、バラツキは $0.03\mu\text{m}$ といわれています。現在のLSIは、 10mm 角程度の面積のなかに4M（メガ）バイトものメモリを焼き付けているわけですが、 $3\mu\text{m}$ ごとにステージを止めて露光させます。線の幅は $0.5\mu\text{m}$ 程度ですから、バラツキが $0.03\mu\text{m}$ でも10回露光すれば、累積誤差は $0.3\mu\text{m}$ になってしまいます。

これでは使いものになりませんから、現在のステッパの場合、送り側にはボールガイドは使わず、面の当たりを取った送りねじを使っているのです。

現在、ニコンとキヤノンがステッパ分野でも競合していますが、その仕上げ組立はやはり熟練技能者のノウハウによるところが大きいと思います。今後さらに集積度を上げて、線幅を $0.3\mu\text{m}$ 以下にしようとする、位置決め精度をもっと上げなければいけません。それと同時に、より波長の短いX線を露光に使おうとしています。マスクを透過するという問題があるので、特殊なマスクが必要になっています。

いずれにしても精密機械屋は、今後さらに微小な送りを考えていかなければならないわけで、これは大変な仕事になります。私は、いずれイオンビームでと考えているのですが、生産性からいうと問題です。ですから現在のところは、ある歩留まりを設定して、後は選択的に生産していくという確率的な加工方法が現実的かもしれません。

ファナックは今、「ナノサーボ・メカニズム」というのを考えていて、 1nm でステップ送りができるものを研究しています。これが実現すると、半導体は現在のような確率的な方法ではなく、機械加工と同じ方法と精度で生産できるようになると思います。その意味で、私のナノ・テクノロジーを真正面から取り上げてくれたのはファナックだと思います。しかし、 nm レベルの位置決めは、実際には大変難しいことなのです。

ファナックの場合、モータも何もすべて空気軸受方式にしていますが、フィードバックをかけながら、しかもピタリと止めなければならぬ。このファナックのメカニズムのモータ軸には軸受がなく、回転子そのものが空気支持されているんですよ。

今いったように位置決め精度が 1nm になれば、日本の半導体生産はさらに上がるはずですよ。もちろん、それにはスループット（生産速度）を上げるために、開発研究とエンジニアリング、そしてシステム化が互いに進んでいかなければ駄目です。

しかし、この頃はあまり加工の研究をせずに、コンピュータを使ってシミュレーションでシステムだけを研究する人がいるので困ったものです。ですから、実際の加工現場とシミュレーションがどれだけ違っているかわからないのです。シミュレーション手法はもちろん立派な学問でしょうが、果たしてそれだけで良いのかとなると疑問です。

——それはどうしてなのでしょう。大学の教授自身がハードに興味がなくなったのか、それとも学生に迎合し過ぎるのか……。

谷口 さあ、それは両方かもしれませんね。とにかく最近の学生のなかには、あまり手を汚すような仕事はしたくないのもいるようですね。

話は少し違いますが、インドではまだ階級制度が残っているために、近代化が遅々として進んでいないということです。工場でも、現場の人と管理職とでは階級が違うので、現場から何か改善を提案しても無駄だということです。

タイも同じで、たとえばタイの東大といわれるチュラロンコン大学を出た者は、マネジメントがエンジニアだと思っているのです。日本のある現地企業が、そうした卒業生を雇って日本式に 1 年間現場実習をさせようとしたところ、わずか 3 か月で辞めてしまったそうです。その理由が、自分はそんな汚い仕事をするために入社したのではないという。

その点、日本に留学したことのあるタイ人の学生は、ある程度それを理解していて、現場の仕事を知らなければ管理もできないのですが、それは口で説明してもなかなかわかってもらえないのです。少なくともタイでは、日本のような大学教育はしていないのではないかと思います。

幸いなことに日本は、明治維新の出発点から実用技術を基本としてスタートしたので、皆が一様に現場で苦労をしてきましたから、叩き上げの技術をあ

まり軽蔑しない、過少評価しない風潮があります。逆にいえば、管理技術は遅れてしまったわけですが、もちろん、その両者がバランスしているのが最も良いのですが、これからはどうなっていくのでしょうか。

アメリカの場合、ある時期から技能を軽視し始めたために、生産技術面では日本に追い越されてしまいましたが、私が初めて行った 1960 年頃は、それは素晴らしい大した国でしたよ。それに、皆何でも親切に教えてくれましたね。私はそれにいちいち感激して、これじゃ戦争に負けたわけだと……（笑）。

アメリカは合理性の国ですから、電磁弁にしても空圧シリンダにしても製品のラインアップが少なく、むしろユーザーがそれに合わせるようになっています。それを日本が、ユーザーニーズに合わせてバラエティに富んだ製品をきめ細かく提供したわけです。それが次第にアメリカを圧倒していく要因になったのです。

それは工作機械でも同じことで、日本の工作機械とくに NC 装置の性能がその命運を分けたといってもよいでしょうね。

私が 1970 年代にボーイング社を見学したときに、通路を挟んで片側にファナックの NC 装置を付けた日本製工作機械が、もう片側に GE 社製の NC 装置を付けた K&T（カーネイ & トレッカー）社の機械がずらりと並んでいましたが、K&T の機械はところどころ動いていないのです。

現場の作業者に聞いたら、工作機械そのものの性能はそれほど変わらないが、GE の NC 装置は故障が多くて困るということでした。何でも最初は日本製機械にも GE の装置を付けていたそうですが、よく故障するので日本製に切り替えたそうです。

もちろん、NC 装置の性能だけじゃないでしょうが、そんなことから日本の工作機械の評判が上がっていったのではないかな。そして同時に、日本企業の現場のエンジニアリング・サービスの努力があったからだと思います。

ただ、最近では日本でも標準化が叫ばれて、生産性を中心とした昔のアメリカの方法に近付いています。これまで日本が柔軟で豊富な製品づくりをしてアメリカを凌駕してきたのとは、まったく逆の方向を目指しているような気がします。

個人的な見解ですが、将来の生産技術は、フレキシブル、多品種の高能率生産を目指すデジタルコン

ピュータ中心の CIM（コンピュータ統合生産）によるシステム管理技術と、やはりデジタルコンピュータによるロボットを含む加工装置技術が中心になると思います。

また一方で、人間の頭脳を中心に、目や耳、手足などを活かした、人間が関与しながら働く生産機械システムズ、あるいはマン—マシンの形を取りながら、付加価値の高いインテリジェントな部品をつくるようになると思います。そしてそれが、今大きく取り組もうとしている IMS（知的生産システム）になるのではないのでしょうか。

——いろいろと貴重な、また示唆に富んだお話をありがとうございました。

（1992 年 12 月 11 日 新宿パークホテル）

出席者（50 音順、敬称略）

稲崎一郎（慶応義塾大学）

梅沢三造（SME 東京支部事務局長）