退官記念講演
UDC 82-53：621.9-52

二工・生研とともに歩んだ38年間

My Research Life of 38 Years in 2nd Faculty of Eng. and Institute of Industrial Science

大 島 康次郎*
Yasujiro OSHIMA

この一文は1980年3月26日，筆者が東京大学教授を定年退官するに当たって行った記念講演を集録したものであります

1. は じ め に

私は昭和15年4月東京帝国大学造兵学科に入学し，昭和17年9月戦時中の繰上げ卒業で同学科を卒業し，直ちに第二工学部造兵学科講師に任命されました．それ以後，二工，生研と38年間，学生時代を加算すると丸40年間東京大学のお世話になり，このたび定年退官することになりました．その間，非常に優秀なる先輩，同僚，後輩の皆様方とともに，恵まれた環境で研究生活を送れましたことを大変幸福に存じております．心から厚くお礼申し上げます．定年を目前にひかえて感慨無量なるものがありますが，二工，生研とともに歩みました過去38年間の研究生活を回顧し，東京大学における最終の記念講演といたしたいと存じます．

ご承知のように，第二工学部は戦時中に技術者養成の軍の要請によって急造され，昭和17年4月に開学されました．私が奉職することになりました10月には，まだ，総武線の西千葉駅がなくて，稲毛の駅から線路づたいに正門まで歩いて通うという状況でありました．当時の二工造兵学科は軍艦大和，武蔵の砲塔を設計された菱川万三郎海軍中将が現役から横すべりで造兵学科主任を任命されておられ，専任は小川正義先生と昨年定年退官されました松永正久先生と私の4名でありました．あとは陸海軍の将官がきら星のように併任教授に名を連ねておられました．

私は併任教授であられた新田重治海軍少将について，磁気コンパス，ジャイロコンパス，ジャイロパイロットなどの航海計器の勉強をして，将来この講座を担当するようにと申しわたされておりました．最終的に私が専門といたしましたサーボ機構と密接な関連のある分野でありました．

戦時中は菱川先生をチーフとして，電気の福田先生，数学の山内先生，応物の平田先生などお偉い先生方で構成された戦時研究班の一員に加えられ，金沢八景にありました海軍空技支廠の爆撃部，光学部に対する協同研究のお手伝いをすることになりました．数学の先生は爆撃弾道の計算，応物の先生は爆撃弾道の計測といったように分担が決められました．私は福田先生のお手伝いで，ジャイロ計器によって爆撃照準器を目標に対してスタビライズするいわゆるコントロールの問題を研究することになりました．

昭和20年に入りますと本格的な空襲が始まり，二工における学生の防空壕掘りの作業の指揮を取ったり，学生の田植え作業の勤労動員の監督などで，肝心の研究は進展しませんでしたが，撃墜されたB 29から鹵獲されたノルデンの爆撃照準器についていたクラッチサーボの実験装置を製作したところで終戦を迎えることになりました．しかし，この戦時研究のお陰で軍隊に召集されずにすみましたことは，私個人にとって大変幸運なことでありました．亡くなられた菱川先生のご配慮に心から感謝申し上げる次第であります．

終戦を迎えてからの造兵学科は大変でありました．直ちに廃止が決まり，精密機械学科への転換がはかられましたが，軌道にのるまでは，たとえば火砲構造の講座を厚肉円筒の塑性理論，魚雷運動論の講座を水中航走体の運動理論といったように糊塗することを余儀なくされました．あの当時，だれ一人として今日の日本の工学，工業の発展を予想することはできなかったと思います．本当に，暗黒な苦難の時代でありました．

戦後の混乱の数年が過ぎ，わが国も真剣に将来の立国を模索するようになり，最初に掲げた国のスローガンは"東洋におけるスイスたらん"ということでありました．政治的には永世中立，工業的には乏しい資源に見合って原料を多く使わず，手先の器用な労働力で加工度を高める精密機械工業の振興を意味しておりました．精密機械工学の将来が拓けるとともに，本郷精密の大越諄教授が中心となって学術振興会に時計の精密大量生産法の研究委員会が設置され，私もその一員に加えられることになりました．私は加工技術よりは力学的問題に興味がありましたので，時計の性能向上の研究に着手することになりました．

*東京大学名誉教授

2. 時計の脱進機誤差の研究[1)~4)]

機械式時計はオランダの物理学者ホイゲンスが1675年にテンプと脱進機を発明して以来300年以上の歴史をもっております．その主要部はテンプとひげぜんまいよりなる調速機およびアンクルとガンギ車よりなる脱進機であります．脱進機の機能を図1に示します．動力ぜんまいの力を受けているガンギ車の歯はアンクルの爪石と噛み合って，図に示すような状態で停止しているとします．テンプが自由振動してきて，テンプについている振り石がフォークの面に衝突すると爪石とガンギの歯の噛み合いが外れます．そのとき，ガンギ車は動力ぜんまいの力で回転し，ガンギの歯が爪石の衝撃面に衝撃力すなわちインパルスを作用させます．このようにして，テンプはインパルスを受けて，再び自由振動を続けることになり，ガンギ車は一定角度回転してアンクルのもう一方の爪石との噛み合いで停止されます．

このように，テンプ振動は脱進機を介してエネルギの授受を行うことになります．すなわち，外しの期間では抵抗を受け，インパルスの期間では衝撃力を受けることになります．このエネルギの授受によって，テンプ振動の周期はその振幅に応じて変化することになります．これが脱進機誤差でありますが，私の時計の研究はその理論的解析からスタートいたしました．

テンプ振動の運動方程式は

$$\left.\begin{aligned}&\text{自由の期間}:\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\omega^2(\theta\pm r)\\&\text{外しの期間}:\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\omega^2(\theta\pm q_i\pm r)\\&\text{インパルスの期間}:\frac{d^2\theta}{dt^2}=-\omega^2(\theta\mp m_i\pm r)\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

ただし，　$\omega^2=\frac{s}{I}$，$r=\frac{R}{s}$，$q_i=\frac{Q_i}{s}$，$m_i=\frac{M_i}{s}$

θ：テンプ角変位，I：テンプ慣性モーメント，s：ひげぜんまいのバネ定数，R：テンプ真の摩擦トルク，Q_i：外しの抵抗モーメント，M_i：インパルスの駆動トルクのように与えられます．$i=1$，2として右振動と左振動を区別します．また，

$Q_i=\varepsilon_i M_i$，$M_2=\kappa M_1$

の関係があり，ε_i，κは脱進機の構造によって決まります．

上記の運動方程式から，図2に示すような回転ベクトルを利用して，左右対称（$\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon$，$\kappa=1$）としたときの脱進機誤差が日差に換算して

$$\Delta=\frac{86.400}{\pi}\times\frac{r}{\Theta}\times\frac{\varepsilon(\beta^2-\alpha^2)+(\gamma^2-\delta^2)}{(\delta-\gamma)-\varepsilon(\beta-\alpha)}\qquad(2)$$

ただし，Θ：テンプ振幅，α：外し開始テンプ角度，β：外し終了テンプ角度，γ：インパルス開始テンプ角度，δ：インパルス終了テンプ角度のように近似的に求められました．

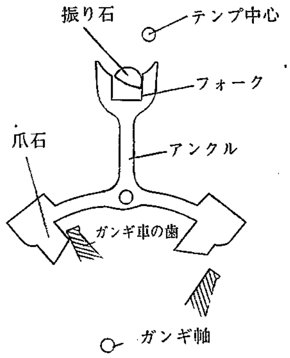


図1　脱進機の機能

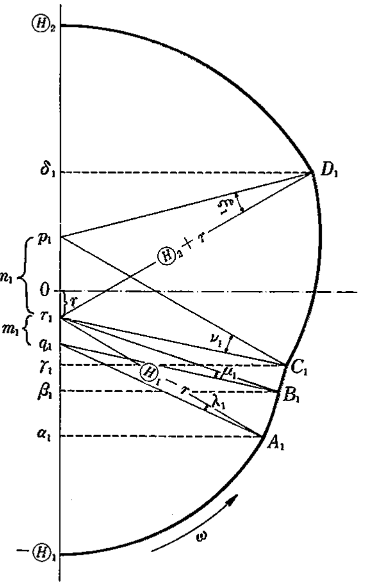


図2　回転ベクトル

次に脱進機誤差の測定実験に着手しました．振幅による周期変化は微小でありますから，時間を拡大して測定，記録する必要があり，正確な時間基準を必要とします．この時間基準のため水晶時計を製作いたしました．これは1,000 kHzの水晶発振器の電気振動を4段のマルチバイブレータ回路で，周波数を1 kHzすなわち1,000 Hzまで逓降し，電力増幅ののち20極のフォニックモータを毎秒50回転させるものでありました．脱進機誤差の測定実験にはこの水晶時計を利用しましたが，その後，1,000 Hzのエリンバ製の音片発振器（精度：10^{-6}）を入手しましたので，これでフォニックモータを直接駆動することができ，また，保守も容易でしたので，それ以後の実験にはこれを利用することにしました．

供試時計には国産およびスイス製のテンプ・エスケープメント・ユニット（写真1参照）を使用し，ガンギ車軸に積算電力計のゼロモータをスプリングを介して取り

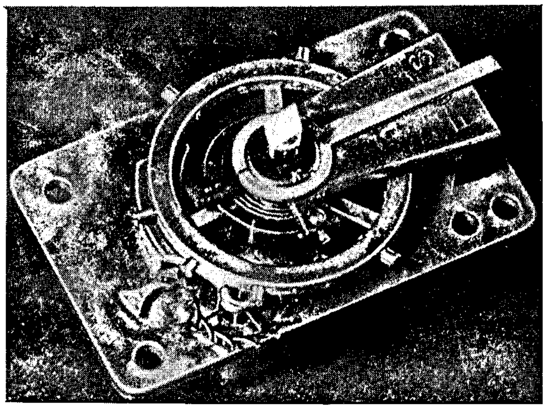


写真1　スイス製テンプ・エスケープメント・ユニット

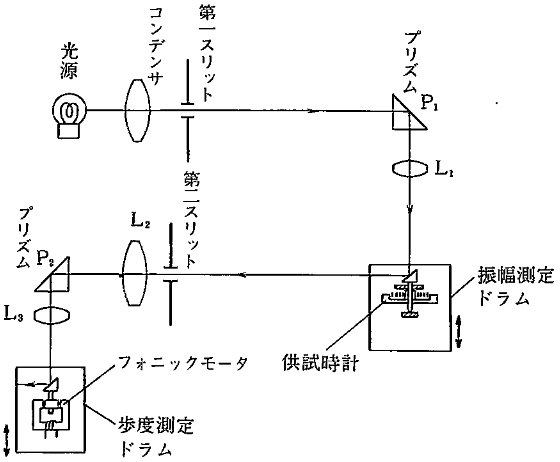


図3　実験装置の光学系

つけ，電力計の電圧，電流両線輪の電圧，電流を加減してトルクを調整し，テンプ振幅を変化させるようにしました．

実験装置の光学系を図3に示します．ヘッドライトランプの光源を出た光は第1スリットを通り，供試時計のテンプ真に取りつけた微小プリズムを垂直に照射する．レンズL_1により第1スリットの像を第2スリットのところに結びます．時計プリズムの周りには振幅測定ドラムがあって，その内面にブロマイドが巻かれます．このドラムは第2スリットへの光の通路に当たる部分を短冊状の窓に切り欠いてあり，その部分をはずしてブロマイドを巻くようにします．テンプ中立位置付近で時計プリズムから反射された光はこの窓を通過してドラムの外に出ますが，その他のテンプ位置では光束はブロマイド上を回転し，振幅が記録されます．ブロマイド上では光は焦点を結んでいないので，時計プリズム回転面内に狭い円周スリットを設けて余分な光を遮断するようにします．

第2スリットにはテンプ左右振動でそれぞれ1回テンプの周期ごとに光が通過することになります．時計プリズムから第2スリットまでの距離を1.7 mに選んでいるので，テンプ周期：1/2.5秒，振幅：180°，第2スリットの幅：4 mmのとき，第2スリットに入る閃光の持続時間は約1/10,000秒程度になります．第2スリットに入った閃光によりレンズL_2, L_3によって時計プリズムの像をフォニックモータ周りの歩度測定ドラム内面に巻かれたフィルム上に結びます．両ドラムはウォーム，ねじ，ナットの機構によってモータで上下方向に送られるようになっています．フォニックモータの回転は毎秒50回転でありますから，テンプ周期1/2.5秒の場合，モータの20回転ごとに歩度測定ドラム上に光点（左右振動で2組）が生ずることになります．歩度測定ドラムの円周長さが約445 mmですから，1/2.5秒のテンプでは相次ぐ光点間の1 mmのずれが日差に換算して9.7 sec/dayに相当します．テンプの数周期の平均をとれば，微小な周期変化を読みとることができます．本装置の測定時間は約40秒であります．

このようにして，時間スケールを拡大することにより，脱進機のついたときの振幅による歩度変化と脱進機を外したテンプとひげぜんまいの自由振動（摩擦により減衰）の振幅による周期変化を分離測定することが可能になり，図4に示すような実験結果が得られました．脱進機付きと自由のときの周期変化の差から脱進機誤差が求められました．この実験結果をさきの理論式による計算結果と比較すると，振幅による相対的変化（これがより重要）は比較的一致していますが，絶対値が合わないことがわかりました．

そこで，テンプがアンクルと噛み合っているときのアンクル自体の慣性モーメントを考慮し，また，テンプ振り石とアンクルフォークの衝突のテンプ角速度変化を角運動量保存則より求め，さらに，テンプがアンクルから離脱するときのアンクルの運動エネルギ損失を考慮して，以前と同様の回転ベクトルを応用して，同期変化を求める理論式（精密法）を導出しました．詳細は省略しますが，改良した理論式からの計算結果は，図4に示すように，実験結果とよりよく合致する方向に改善されました．

3. ひげぜんまいの非直線性についての研究[5)~8)]

図4に示したように，脱進機誤差測定実験におけるテンプ自由振動の振幅による周期変化がいろいろの形になって現れることがわかりました．これはひげぜんまいのトルクがテンプ回転角に対して線形でない，いわゆるひげぜんまいの非直線性の影響であります．従来これの測定は不可能であったわけですが，時間スケールを拡大した実験方法によってそれが可能になりましたので，これについて組織的な測定実験を行うことにしました．

まず，調べたのはひげぜんまいの偏心の影響であります．平ひげの場合には，ひげ曲線はアルキメデス・スパ

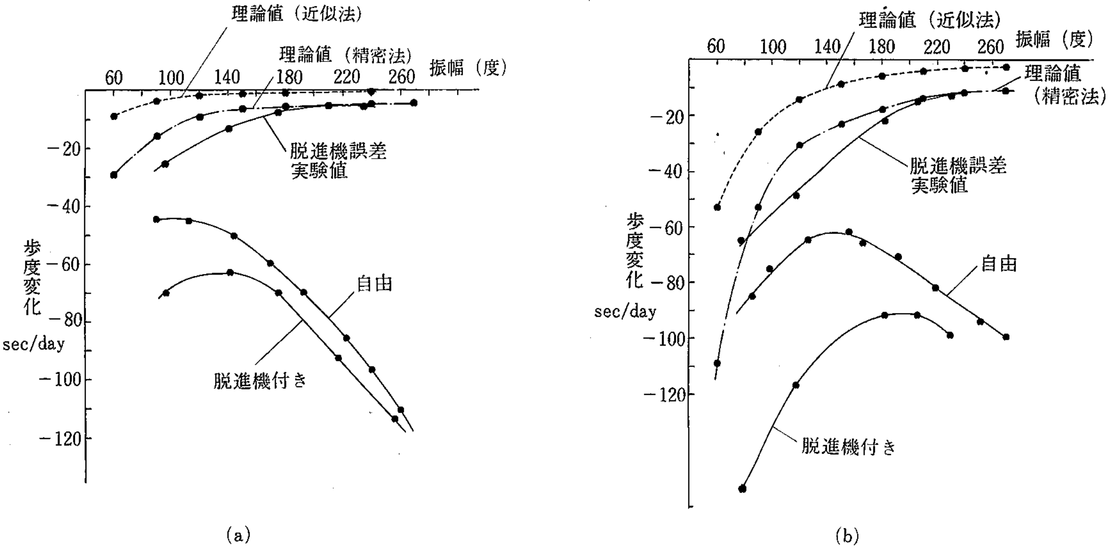


図4　脱進機誤差の実験結果

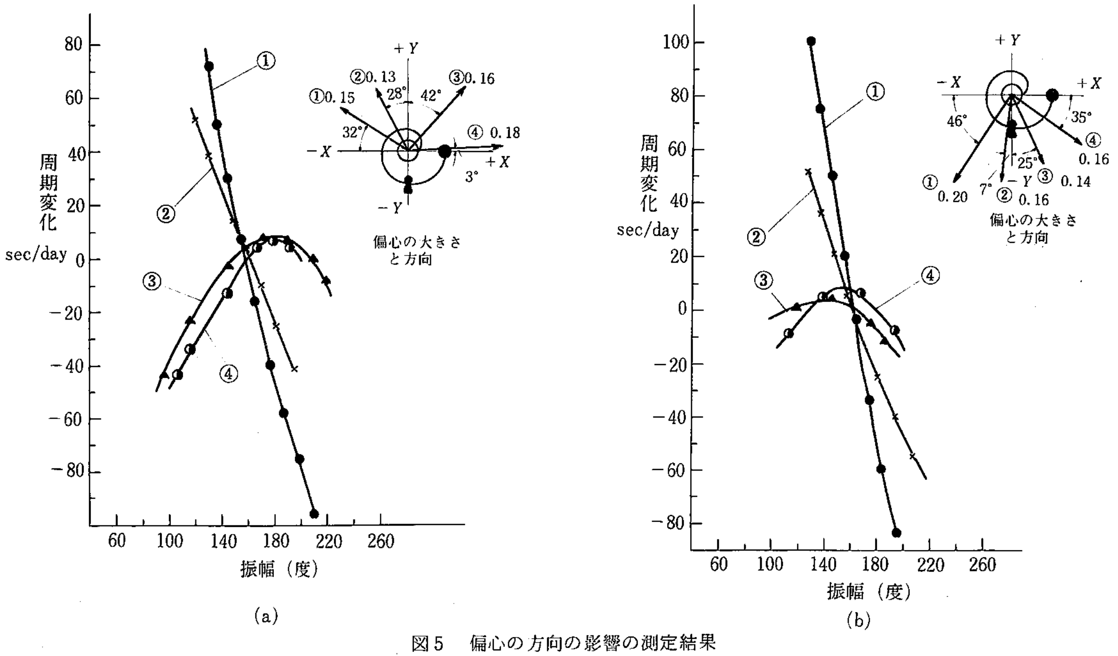


図5　偏心の方向の影響の測定結果

イラルでありますが，この幾何学的中心がテンプ回転軸中心からずれていることが偏心でありますが，その大きさと方向の影響について調べることにしました．偏心はひげ内端をくせ付けして与え，ひげ曲線のスパイラルがテンプ真を通る x，y 座標軸と交わる点の中心からの距離をプロジェクタ（マイクロメータ載物台をもつ）を利用して測定し，これより偏心を算出しました．偏心の方向の影響の測定結果の1例を図5に示します．偏心の方向の影響については，ひげ巻き角（ひげの始点からカーブピンまでのスパイラルの角度から $2m\pi$ を差し引いた角度．ただし，mはターン数をあらわす整数）が270°，180°，90°，0°の四つの場合について測定しました．巻き角：270°の図5の測定結果から，偏心の方向によって周期変化の形が著しく異なることがわかりました．

次に，カーブピン取付歪みの影響について調べました．カーブピンは緩急針（歩度の進み遅れを補正するためにひげの有効長さを微小に調整する目的をもつ）の調節用に設けられています．ひげ外端はスタッドで地板に固定されています．カーブピンの2本のピンがひげを挟んでおりますが，この部分が半径方向に外方または内方にひ

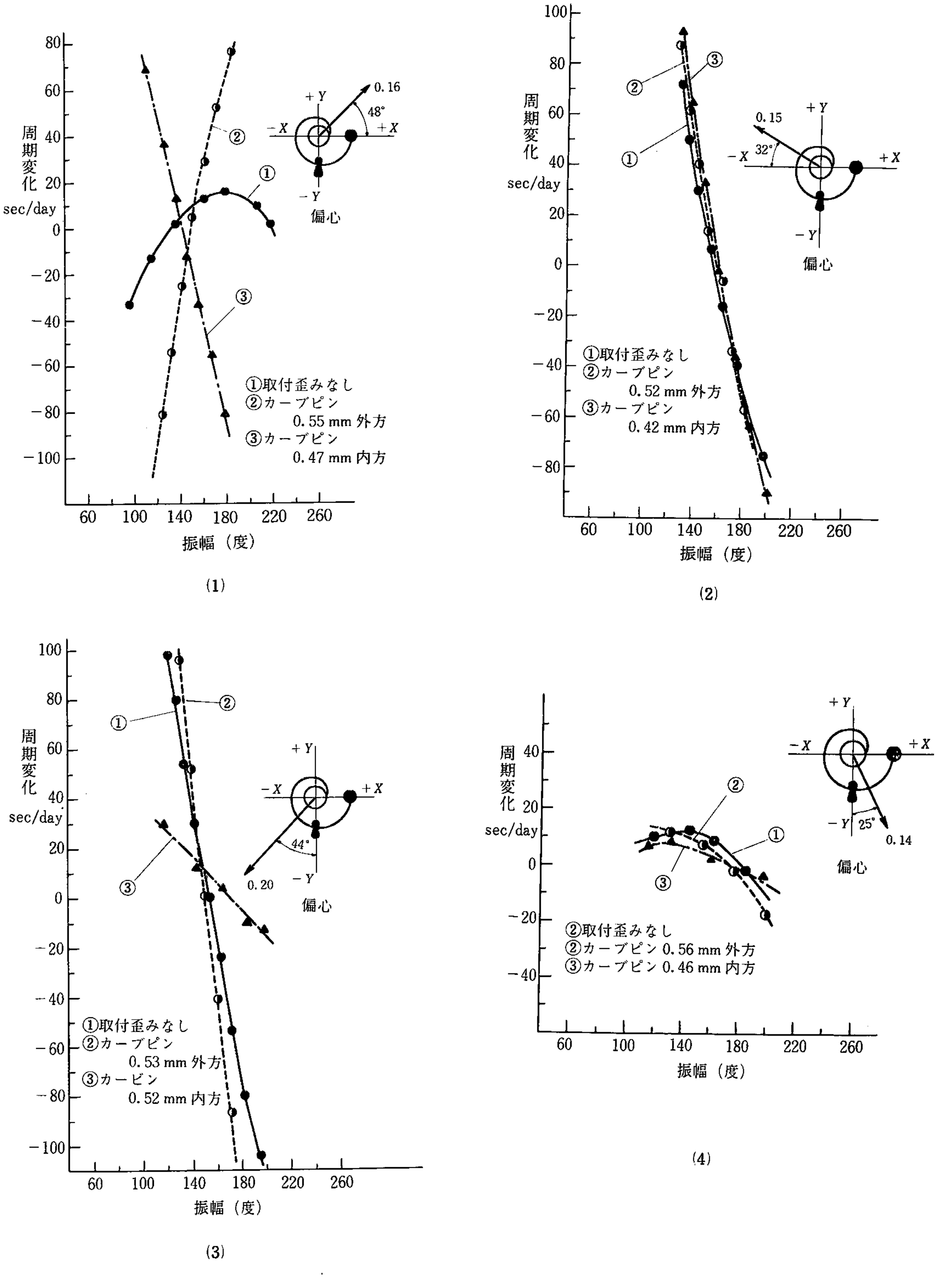


図6　カーブピン取付歪みの影響の測定結果

げ自由なときの曲線よりずれていますと，カーブピン取付歪みが生じます．カーブピン取付歪みの影響の測定結果を図6に示します．これより次のことがわかりました．

（1）偏心の方向が第1象限にある場合，外方のカーブピン取付歪みで，振幅の減少により遅れ側になり，内方の取付歪みで進み側になります．（2）偏心の方向が第

2象限にある場合，取付歪みの影響はほとんど現れておりません．（3）偏心の方向が第3象限にある場合，外方の取付歪みで進み側になり，内方の取付歪みで遅れ側になります．（4）偏心の方向が第4象限にある場合，取付歪みの影響はほとんど現れておりません．

巻き角180°，90°，0°の場合についてもカーブピン取付歪みの影響を測定しましたが，いずれの場合も，偏心の方向が第1，3象限のとき取付歪みの影響が大きく，しかもその進み側，遅れ側が逆転していることおよび第2，4象限のある偏心の方向で取付歪みの影響がほとんど現れないということがわかりました．この移り変わりは連続的で，取付歪みの影響が現れない方向に近づくにつれて変化が少なくなり離れるに従って大きくなっております．

以上の実験はすべて鋼性ひげを用いて行いました．エリンバひげ，燐青銅ひげについても行いましたが，偏心，取付歪みの影響はひげ材料によってそれ程左右されないことを確認しました．Jaquerod氏がひげ材料の弾性がフックの法則から外れ，時計指示差の主要な原因になることを各種材料についての実験に基づいて指摘しておりましたが，これは誤りであり，ひげ非直線性の影響は偏心および取付歪みによることが明らかになったのであります．

偏心の方向によって取付歪みの影響が逆転するという特異な現象については理論的解析を試みました．これには自由端ばね（外端がモーメントだけを受けて自由に移動できるように支持したばね）の内端がテンプとともにある角度だけ回転したときの外端変位Δを計算し，これから外端固定の場合の周期変化δを求めるGoudsmit & Wang氏の下記のような理論式を利用しました．すなわち

$$\Delta=j\frac{\alpha}{l}e^{j\alpha}\int_0^l z(s)e^{-j\alpha s/l}\,ds \qquad (3)$$

$$\delta=\frac{1}{2A^2T}\int_0^T\frac{d\xi}{d\alpha}\cdot\alpha\,dt \qquad (4)$$

ただし

$$\xi=\frac{(\Delta)^2}{I},\quad I\fallingdotseq\frac{1}{l}\int_A^B x^2ds\fallingdotseq\frac{1}{l}\int_A^B y^2ds$$

ここで，s：内端からのひげ曲線上の1点までの長さ，l：ひげの全長，$z(s)$：ひげ曲線上の1点の複素数表示，α：ひげ内端の回転角，A：テンプ振動，T：テンプ周期であります．ひげに偏心，取付歪みのある場合，座標軸を図7のように選びます．ここで，O：ひげの幾何学的中心，O'：回転中心，$OO'(=h)$：偏心，λ：スタッドの取付歪み（外方を正）とします．このとき偏心のあるスパイラルひげでは

$$z=a\theta e^{j\theta}+jh \qquad (5)$$

のように表されるから

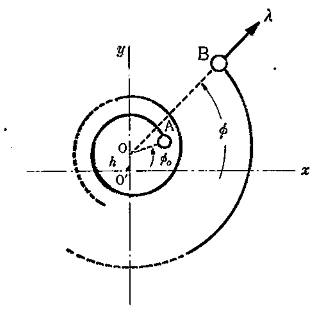


図7　偏心，取付歪みのある場合の座標軸

$$s\fallingdotseq\frac{1}{2}a(\theta^2-\phi_0^2) \qquad (6)$$

の関係を利用して，（3）式による積分を実行し，（4）式により取付歪みλに関係した周期変化を求めると

$$\delta_\lambda=\frac{1}{I}\left\{\lambda\frac{a^2}{l}\phi_0^2\sin(\phi-\phi_0)J_0(A)+\lambda h\sin\phi\frac{J_1(A)}{A}\right\} \qquad (7)$$

が得られます．J_0，J_1は0次，1次のベッセル関数です．

この式からわかるように，$\phi-\phi_0=2n\pi$ または$(2n+1)\pi$すなわち巻き角0°または180°のとき第1項は0となり，$\phi=2m\pi$ または $(2m+1)\pi$ すなわちひげ中心からスタッドへの方向と直角の向きに偏心があるとき$\delta_\lambda=0$となり，取付歪みにより振幅に応じた周期変化が影響を受けないことになります．$\phi=\left(2m+\frac{1}{2}\right)\pi$ または$\left(2m+\frac{3}{2}\right)\pi$ すなわち偏心の向きがスタッドの方向またはそれと反対の場合に$\sin\phi=\pm1$となって，取付歪みの影響が最も大きく，しかも，その影響が逆転することになります．さきの実験ではスタッドのほかにカーブピンで支持し，ここに取付歪みを与えているので，理論式の場合の条件とは異なっております．

そこで，理論式の結果を確認するため，さきの実験に使用したテンプ・エスケープメント・ユニットと比べると約8倍の大きなテンプ・ぜんまいモデルを製作しました．テンプ軸はミニアチュアベアリングで支持し，ぜんまいは厚み1 mm，幅5.4 mm，外径130 mmの大きなものを使用しました．このように大きくなりますと，偏心したテーパ子を利用して，一定の大きさの偏心をどの方向にも与えることができ，外端のスタッドも半径方向に移動して一定の大きさの取付歪みを与えることができます．この大きなモデルを利用して取付歪みによる周期変化を測定したところ，さきの理論の結果が完全に正しいことが実証されました．そしてぜんまいの寸法と偏心，取付歪みの大きさが相似的であれば，テンプ・エスケープメント・ユニットの場合と周期変化がほとんど同じであることが確認されました．このことはテンプ・エスケープメント・ユニットの実験結果がはるかに小さい腕時計の

調速機にも適用できることを示したのであります．なお，このモデルを使って，自由端ばねとして支持した場合の外端変位を測定し，Goudsmit & Wang 氏の理論式の外端変位の計算値と比較し，かなりよい一致を示すことを確認しました．

そして，私の時計の研究の結論として，脱進機誤差による周期変化をひげの非直線性で相殺し，振幅により歩度変化を生じない調整の可能性を指摘したのであります．この時計の研究には，柴田耕作，小出栄，江川巌3君に手伝ってもらいました．

その後，わが国の機械式時計の性能は飛躍的に向上し，スイスで毎年開催されていたクロノメータの国際コンクールで上位を独占するようになり，スイスがその開催を取り止めるようになったのであります．しかし，1960年にブローバ社から音片発振器を利用した電子時計が発売され電子時計の時代に突入したのであります．1969年にはセイコー社から水晶発振器を利用したセイコークウォーツが発売されました．私が時間基準に利用した水晶時計が腕時計になるとは当時としては夢想だにできなかったことで，技術の進歩の急速なことにただ驚くばかりであります．電子時計は正確なばかりでなく，特にディジタルウォッチはコストダウンの可能性があるので，機械式時計の時代は終焉を迎えたということができるでありましょう．しかし，日本の時計産業がスイスを抑えて世界の王座についたことは喜びにたえません．

4. 自動制御の研究

私は時計の研究を実施するかたわら，自動制御の研究を開始しておりました．と申しますのは，戦後間もなく，昭和22年9月にさきに述べた戦時研究が端緒になって福田節雄先生が中心となって，第二工学部に自動制御懇話会が誕生したからであります．この会には高橋安人先生も最初から参加されました．自動制御技術に技術革新的な可能性と発展性とをいち早く感じとった少数の研究者グループが戦後の廃墟と混乱の中でその研究に情熱を燃やして取り組もうとしたのが懇話会誕生の動機でありました．懇話会の初期はアメリカの戦時中における自動制御関係の研究成果がようやく発表されるようになった時期でありましたので，それらを紹介し合う勉強会の性格をもっておりました．物資の欠乏した最悪の時代でありましたが，第二工学部でふかしいもを喰べながら熱心に討論を行った懇話会の思い出は終生忘れ得ないものがあります．私は当時日比谷にあったCIE図書館でMcCollのFundamental Theory of Servomechanismの本を筆写したことを今でも憶えております．蘭学事始めの時代と同じようなことを行っていたことになります．しかし，アメリカでは戦時中MITを中心として行われたRadar Automatic Trackingの戦時研究の成果が全28巻のRadiation Lab. Seriesの双書として刊行されていたのであります．その中のTheory of Servomechanismは1947年すなわち懇話会発足の年に刊行されており，その中には統計的サーボ理論などの先端的な理論が展開されていたのであります．

懇話会は昭和24年7月から自動制御研究会として体制を整え，組織的運営が行われるようになり，昭和37年1月から日本計測学会と合併して，今日の計測自動制御学会へと発展したのであります．

私の自動制御についての研究は昭和25年頃から自動制御の最適条件についての理論的解析[9]とかプロセス制御系の電気的シミュレーションの研究[10]とか基礎的研究からスタートしました．このシミュレーションでは，純粋むだ時間を当時やっと製品化されるようになったテープレコーダの特殊仕様の録音機構と周波数変調（FM）の記録再生方式を利用してシミュレートすることにし，調節計モデルには電子管式PID調節計を採用しました．今日一般的になりましたエレクトロニク調節計をシミュレーションに利用しましたことは興味深く思い起こされる次第です．

次に，私が本格的に取り組みました制御の研究はNC工作機の研究であります．NC工作機はアメリカ空軍からの依託研究により融通性のある自動加工を目的として，MITのPease, Forrester氏らにより，フライス盤を対象として，1952年に試作が完成したのであります．これは当時すでにある程度の発展段階に達していたディジタル計算機とサーボ機構の両技術を有機的に結合したもので，制御に対するディジタル技術の導入という点で画期的なものでありました．MITでの研究成果はMIT Reportとして公表されました．当時，たまたまフルブライト交換教授としてMITで研究しておられた高橋安人先生から私はこのリポートをいち早く入手することができました．私はこの技術の将来性に着目し，さきに述べたシミュレーションの研究のときから手伝ってもらっておりました富成襄君とともに計数形サーボの試作[11]に着手いたしました．MIT方式ではフィードバックパルス発生にコンミュテータ方式を採用しておりましたが，これではノイズが大きいことがわかりましたので図8に示すような光学的方式を採用しました．これは今日一般的に使用されている光学式エンコーダであります．当時はまだ真空管の時代でしたので，カウンタが問題で，真空管の数を減らすのに英国エリクソン社製のダブルパルスデカトロンと称する10進の計数管（6 kHzまで安定に動作）を採用しました．研究を行うかたわら，NCの解説，紹介に努めました．

そうこうしておりますうちに，昭和31年から機械試験所（現在の機械技術研究所）でNC工作機のプロジェクト研究が3カ年計画で行われることになり，私も招かれ

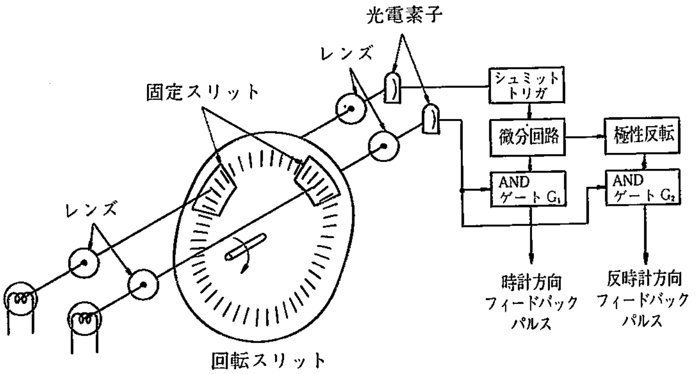


図8　光学式エンコーダ

て併任研究員として参加することになりました．この研究にはNCジグボーラの開発とフライス盤のNC化の研究という2本の柱がありましたが，私は後者に参加しました．私が担当しましたのは計数形サーボ機構と電気油圧サーボ弁による油圧サーボ駆動でありました．電気油圧サーボ弁については，アメリカMoog社が開発して製品化しておりましたが，その優れた応答性の故に着目し，その理論解析[12]を私自身行っておりましたので，これを機会にMoog方式とは異なる油圧平衡方式サーボ弁を開発し，日立製作所川崎工場で製作してもらい，同社のフライス盤の試験所におけるNC化の研究に応用いたしました．計数形サーボの光学式エンコーダは日立精機に製作してもらい，同社と日立との別々のフライス盤のNC化にそれぞれ応用いたしました．これらNCフライス盤で実際に削りましたワークを写真2に示します．これらの研究成果につきましては，1958年10月にマドリッドで開催されたオートメーション会議で発表いたしました．[13]これは当時の機械試験所杉本正雄所長にスペインから招きがあり，佐治木清吾課長と私とがお供をして会議に参加したからであります．これが私にとっての最初の海外出張でありました．

NCに関しましては，直動形の精密な位置検出としてFarrand社のインダクトシンをいち早く紹介いたしましたが，高価であり，調整が難しいということで，これにかわる安価で精密な直動形検出器ができないだろうかと試みました．そして，角ねじをコアとし，これの周囲に巻かれた二つのコイルを固定抵抗とでインダクタンスブリッジを形成し，角ねじの直動または回転によるコイルインダクタンス変化で生じるブリッジ不平衡電圧で変位を検出するねじ検出器を東芝機械の木村浩哉君とともに開発しました．ねじを組立式とし，ねじエレメントの単位長さをコイル軸心方向の長さと一致させ，ねじエレメントを相互に回転調整して固定し，ねじの累積ピッチ誤差を除去するという原理を採用いたしました．図9に構成を，図10に累積ピッチ誤差除去の原理を示します．

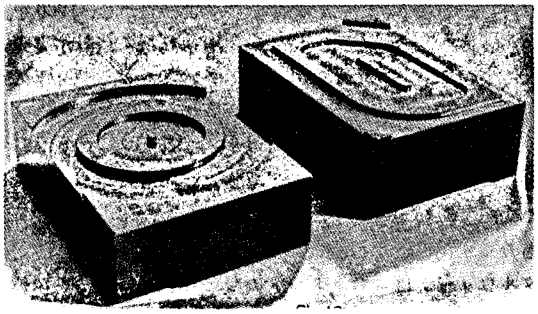


写真2　NCフライス盤で加工したワーク

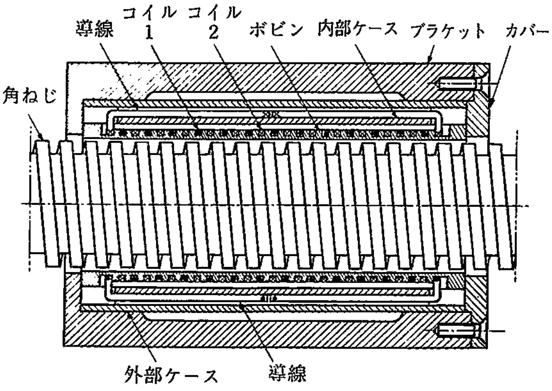


図9　ねじ検出器の構成

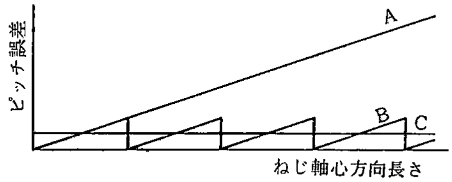


図10　累積ピッチ誤差除去の原理

このようなねじ検出器を利用して，NC位置決め装置を試作しました．[14],[15]これの特徴は初めてディジタルアナログ結合方式を採用したことであります．目標位置から遠く離れている間はねじ検出器の出力波形を整形微分

してえられるパルスをフィードバックするディジタルサーボとして動作し，ねじ検出器のねじの2mmピッチの動作範囲に入ると，そのアナログ電圧をフィードバックしてアナログサーボとしてその検出電圧がゼロの位置で整定させるという方式であります．このゼロ位置はねじ検出器のねじをステップモータで回転して0.01mmごとにセットするようにしました．この装置の位置決めの繰返し精度は0.2μmという高性能を示しました．この装置は東芝機械における精密カム製作のためのNCグラインダに利用され，その性能を発揮しました．

その後，わが国のNC産業は富士通ファナックが中心となって急激に成長，発展し，現在では月産約2,000台の規模に達し，世界の首位を確保するようになりましたことは欣快にたえません．

この富士通の当初のNC方式は同社が独自に開発した電気油圧パルスモータを利用したものでありました．私もこのステップモータには早くから注目し，乱調を防止する特殊な駆動法について，江川君に手伝ってもらって研究を実施し，1960年にモスコーで開催されたIFAC第1回国際会議で発表いたしました．[16] このステップモータは今日でいうVR (Variable Reluctance) 形で，実験に使用したモデルステップモータはステータが12極，ロータの歯数が8という図11に示す簡単な構造のものでありました．駆動法の原理を図12に示します．図でステータのⅠ相とⅡ相が励磁されていたとすれば，ロータの歯はⅠ，Ⅱ相による反対方向の磁気的吸引力によって図の位置で平衡しております．そこで，Ⅰ相の励磁を切ると，ロータの歯はⅡ相の磁気的吸引力によって駆動されますが，ロータ軸の摩擦が少なければ，ロータは慣性によって行き過ぎ，図の点線の位置に達して速度ゼロとなります．その瞬間にⅢ相を新たに励磁すれば，ロータはⅡ，Ⅲ相の反対向きの磁気的吸引力によって図の点線の位置に静止します．次は，Ⅱ相の励磁を切り，行き過ぎた位置で新たにⅠ相を励磁するといった具合に，1，2相励磁を交互に繰り返すという駆動法であります．このようにすれば，乱調なしに応答しますので高い駆動パルス数にまで応動することができます．行き過ぎた位置で新たに励磁を加えるには，ロータの歯が実線の位置から点線の位置まで移動するのに要する応答時間だけ遅らせてスイッチングするようにすればよいわけです．このような駆動法は従来の1相ずつを励磁する方式と比べて乱調を少なくすることができ，ステップモータの性能を向上できることを高速度カメラによる実験および機械的微分解析機による解析によって確認することができました．

私はステップモータを放電加工機の電極送りに応用することを初めて試みました．1回の放電で除去するワークの微小量に相当するだけ電極をステップモータでステップ状に送ることにより，放電間隔がつねに適当に保持

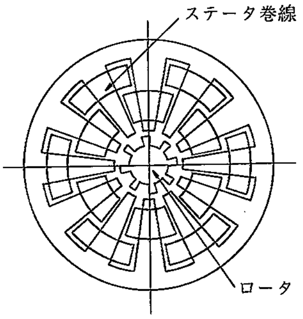


図11　モデルステップモータ

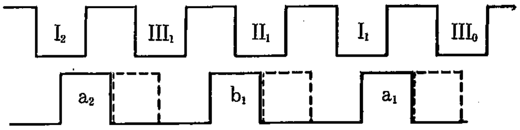


図12　ステップモータ駆動法の原理

されて，それまでの油圧または電気サーボによる電極送り方式と比べて，良好な放電加工が得られることを確認しました．[17] ステップモータの研究は私の後継者である樋口俊郎助教授に継承してもらうことにいたしましたので，今後の研究の発展を期待してやみません．

NCに応用しました電気油圧サーボ弁につきましては，その後荒木獻次君に手伝ってもらって理論解析，実験[18]を実施いたしました．油圧サーボは圧力を高めることによりコンパクトで大きなトルクを発生しますので，トルク慣性比が大きく高速応答がえられるという性能上の利点をもっております．ただし，作動油の管理，油洩れ，廃油の処理など使用上の不便宜のため電気サーボに劣ります．オイルショック以来インダストリアルには油離れの傾向がでておりますが，航空機やその他の原動機付乗物では，ポンプを原動機で駆動することでコンパクトなシステムを構成することができるため断然有利であります．機械試験所におけるNCの研究にひきつづいて昭和36年から同所における自動車の自動操縦の特別研究に参加しました．これは自動車の耐久試験や危険なテストを無人化する目的で行われましたもので，同所の菊池英一，木村誠，松本俊哲各氏らとともに研究を実施いたしましたが，これに油圧サーボを応用しました．自動操縦の原理を図13に示します．地下に埋設したガイダンスケーブルに4.3kHzの交流を流すと，その周りに交番する円形磁界を生じます．自動車の前後のバンパに取りつけた4個のピックアップコイルがこの円形磁界と鎖交して交流電圧を誘起します．これから自動車のガイダンスケーブルからのコースずれと振れ角とが検出されます．また，前輪に取りつけたポテンショメータで前輪の操縦角度が検出されます．これらの検出信号がエレクトロニックコントローラに導かれ，その出力で電気油圧サーボ弁を介

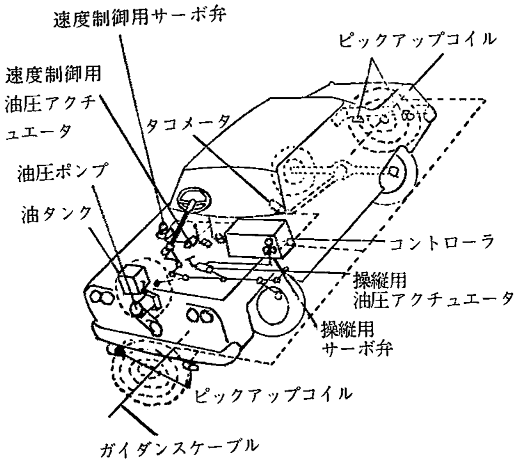


図13　自動車自動操縦の原理

して，操縦機構のタイロッドに結合された油圧アクチュエータを駆動するようになっております．コントローラには位相進み補償を加えております．一方，トランスミッションに結合されたタコメータによって車速が検出されます．設定速度からの偏差に応じてコントローラの出力で電気油圧サーボ弁を介して油圧アクチュエータを駆動し，アクセルまたはブレーキメカニズムを操作するようになっております．アクセル系統ではスロットルバルブの開き角がポテンショメータでフィードバックされ，ブレーキ系統ではブレーキ圧が差動変圧器付圧力センサによりフィードバックされます．また速度偏差が大きいときには，加速度制御が行われるようになっております．以上のような制御システムにより全長2kmの村山のテストコースで時速60 kmの完全無人運転に成功しました.[19] この屋外実験は子供の頃の夢がかなえられたような本当に楽しいものでありました．

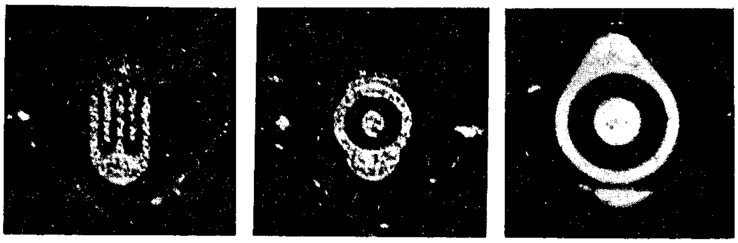
次に，行いました研究はフルイディクスに関してでありました．可動部分なしに純流体的に流体の流れをコントロールまたは切り換える素子でありますが，機械的に論理演算ができるということで流体論理素子とも呼ばれ，注目を集めました．簡単な設備で研究ができるということで，国の内外で大変多くの研究者また企業が研究に着手しました．私もそれまでに電気，油圧と取り組んで空気圧はノータッチでしたので，興味をもって空気の論理論子について研究を開始しました．ダイクリルと称する感光性樹脂のフォトエッチングで素子の流路パターンを実験計画法に基づいていろいろに変え，そのスイッチング性能を調べ，適当なベントすなわち大気開放口を設けることにより，良好な切換特性すなわちベントスイッチングが得られることを見出し，松本義雄君にこれについて詳細に研究してもらいました.[20] しかし，空気圧論理素子はエレクトロニクスのICからLSIへの急速な進歩には対抗することができず，大騒ぎされた割には急速にしぼんでしまいました．フルイディクスは論理素子としてよりは流体の流路を切り換える分流弁としての機能の方が将来性ありと考え，動作流体として水を用いる側壁付着形素子の特性についての研究を木下修君にやってもらいました.[21)~23] 今日，フルイディクスはエアコンディショニングや圧延機冷却水の切換弁程度にしか実用されておりませんが，高温，振動，放射能などの悪環境下で安定に動作することや防爆などの特徴があるので，いつか見直されることがあるかもしれません．

次に，取り組みました研究は環境汚染制御の研究であります．これは京都大学樋木義一教授が中心となって文部省科研費の特定研究にこの問題を取り上げるということで参加を勧誘されたからであります．汚染源から排出される汚染質の大気拡散について，Fickの拡散方程式を有限要素法を利用して解く計算アルゴリズムを作成し，コンピュータによる計算値を観測データと比較するという研究を毛利尚武君に手伝ってもらって行いました.[24),25] また，熱汚染制御の水槽モデル実験も行いました.[26),27]

私が最後に本格的に取り組みました研究は微小パターンの精密位置決めの研究でありました．トランジスタやICなどの製造工程ではボンディングやマスク合わせなどのパターンを精密に位置決めする作業が必要であります．私が半導体工場を初めて見学したときには，トランジスタのボンディング作業を若い女工さんがステレオの顕微鏡で覗きながら人海戦術で行っておりました．この作業は極めて単調であり，また眼を酷使するものでありました．このような単調反復作業から人間を解放することこそが自動制御の使命であると痛切に感じ，その自動化の研究を思いたったのであります．

トランジスタの電極パターンを傾斜照明すると，鏡面に研磨されたシリコン半導体の面は完全反射するのに対して，アルミを蒸着した電極面はその凹凸によって乱反射するので，写真3のような明暗のコントラストのはっきりしたパターンが得られます．この電極パターンの大きさは数百ミクロンですから，これを位相差光電顕微鏡でとらえようと思いついたのであります．

位相差光電顕微鏡の原理は，図14に示すように，スリットと光電素子の2組を光軸に対してわずかにずらすことにより，光電素子からの出力が位相がずれて現れるようにし，その出力を差動増幅器で差し引き，波形整形ののち微分することで，パターンの一定の位置でパルス(位置確認パルスと呼ぶ)を発生するようにしたものであります．トランジスタパターンの位置決めでは，スリットを図15に示すようにL形とします．パターンをステップモータでY軸方向に送ると，S_{y1}, S_{y2} のスリットで位置確認パルスを発生しますが，Y軸ステップモータの駆動は継続し，その駆動パルスを可逆カウンタで計数します，



(a) 2 SC 455
(320×160 μm)
プレーナ形

(b) 2 SC 454
(270×190 μm)
プレーナ形

(c) 2 SC 281
(340×280 μm)
メサ形

写真3　トランジスタ電極パターン

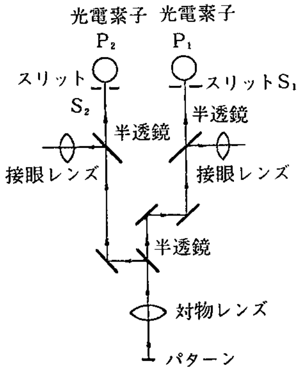


図14　位相差光電顕微鏡の原理

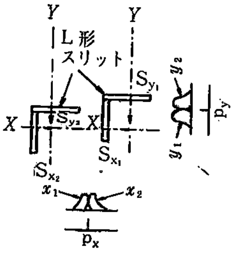


図15　L形スリット

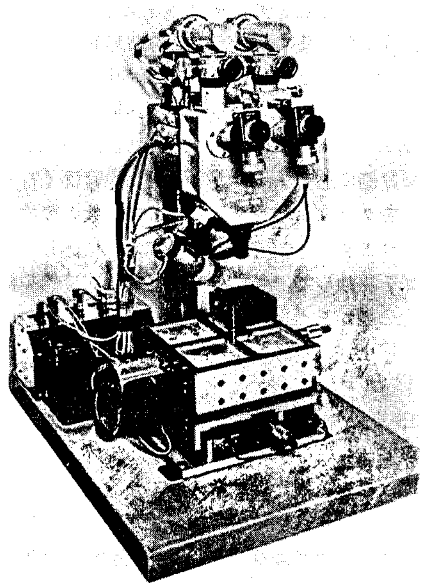


写真4　L形スリットをもつ位相差光電顕微鏡

表1　トランジスタパターンの位置決め精度

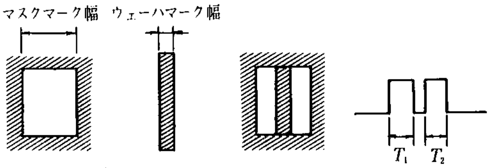
トランジスタ種類	初期回転位置 / X方向初期位置	位置決め精度 ±0°	位置決め精度 ±10°
2 SC 455	200 μm	±1 μm	±4 μm
	600 μm	±2 μm	±5 μm
2 SC 454	200 μm	±3 μm	±5 μm
	600 μm	±3 μm	±6 μm
2 SC 281	200 μm	±1 μm	±4 μm
	600 μm	±1 μm	±4 μm

そして，あらかじめセットした数に達したならば，Y軸ステップモータの駆動を停止し，X軸ステップモータの駆動を開始してパターンを左側に送ります．スリットS_{x1}，S_{x2}の二つで位置確認パルスが発生したなら，その位置で直ちにX軸ステップモータを停止すれば，パターンの初期位置に関係なく，つねに同じ位置にパターンが位置決めされることになります．この実験に用いた光電顕微鏡を写真4に示し，その位置決め精度を表1に示します．この研究には清川盛雄君の協力を得，その成果は1969年のワルソーにおけるIFAC第3回国際会議で発表しました．[28] これは半導体微小パターン自動位置決めの世界で最初の研究であったと自負しております．

次に取り組みましたのがマスク合わせの自動化であります．ICの製造にはフォトエッチング技術が利用されており，フォトレジストをコーティングした半導体にフォトマスクを密着または投影して露光し，現像処理のあとエッチングして不純物を拡散し，再び上記のプロセスを6～9回反復してICチップを作製するようにしております．2回目以降の露光では，前回のエッチングで刻まれた回路パターンにフォトマスクを正しく位置合わせし

なければなりません．そこで，このマスク合わせの自動化の基礎実験を実施いたしました．[29]

図16に原理を示すように，マスクにはフレーム状のマークを，ウエーハには短冊形のマークを付け，ウエーハマークがマスクマークの中央にあるときをマーク整合位置とします．この相対的関係位置を検出するのに，走査形光電顕微鏡で光学的に回転走査することにしました．実験装置の構成を図17に，走査形光電顕微鏡の外観を写真5に示します．回転走査は正方形プリズムをシンクロナスモータで回転して行いました．マークの像を対物レンズによりスリットの所に作り，スリットに入る光量を光電素子で受光します．光電素子の出力波形は図18に示すようになりますから，これを波形整形し，パルス間隔T_1の間アンドゲートを開いて10 MHzのクロックパルスを通して可逆カウンタの加算側へ加え，パルス間隔T_2の間別のアンドゲートを開いてクロックパルスをカウンタの減算側に加えます．カウンタの内容は（T_1-T_2）の時間差をクロックパルスのパルス周波数の単位で表すことになります．この向きおよび大きさに応じてステップモータを駆動して，マークの相対的関係位置を修正し，(T_1-T_2)の値があるしきい値に達したところでステップモータを停止します．ステップモータによるテーブルの駆動は1パルス0.05μmとしました．実験結果の1例を図19に，そのヒストグラムを図20に示します．99.7％の信頼率で±0.5μmの位置決め精度が得られました．この研究には松本義雄，岡本啓一両君の協力を得ました．なお，現在製品化されているキャノンのマスクアライナは同様な回転走査により±0.5μmの精度を実現しております．



(a) マスクマーク (b) ウェーハマーク (c) マーク整合位置 (d) 検出信号

図16　マスク合わせの原理

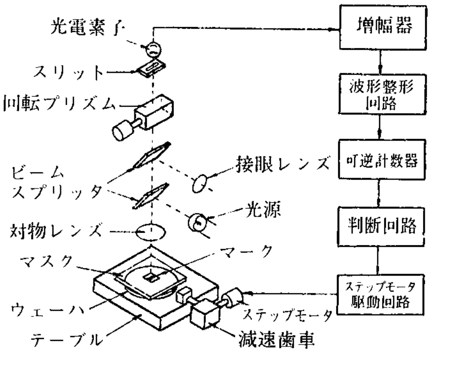


図17　マスク合わせ実験装置の構成

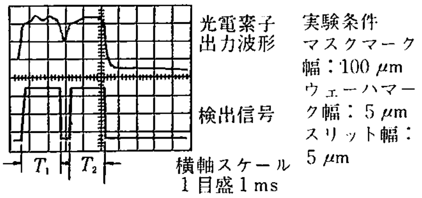


図18　光電素子の出力波形

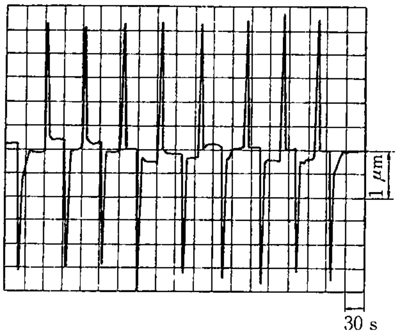


図19　マスク合わせの実験結果

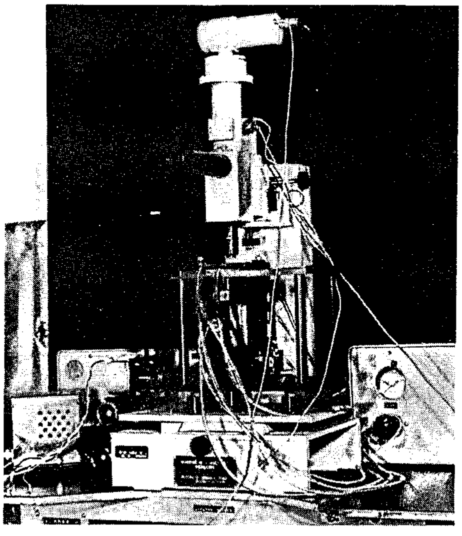
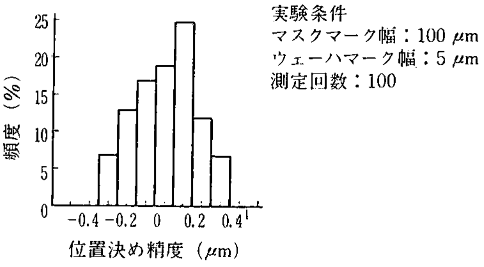


写真5　走査形光電顕微鏡の外観



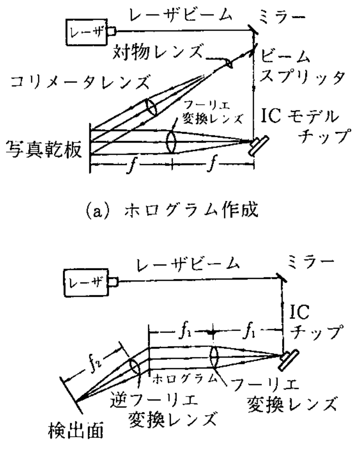
標準偏差　　　：0.16 μm
99.7％ 信頼率：±0.5 μm
95％ 信頼率　：±0.3 μm

図20　実験結果のヒストグラム

最後に挑戦しましたパターン位置決めはレーザホログラフィを利用する方法であります.[30),31)] この方法は回路パターンそのもので位置決めするため，マークをつけるマーキングが不要な点に特徴があります. 図21に示すような光学系であらかじめホログラムを作成します. すなわち，モデルパターンからの反射光をフーリエ変換レンズに通した物体光とオートコリメータレンズで平行光束とした参照光とを写真乾板に当て，両者の干渉じまをホログラムとして記録します. 位置決めにおいては，モデルパターンと同種の位置決め用パターンからの反射光をフーリエ変換レンズに通して，これでホログラムを照射します. すると，ホログラムから前にそれを作成するとき用いた参照光の方向に回折光がたたき出され，逆フーリエ変換レンズの焦点面にシャープな光学的スポットを生じます. これはパターンの自己相関像であり，位置決め用パターンの並進運動に比例して移動することになります. そして，フーリエ変換レンズの焦点距離をf_1，逆フーリエ変換レンズのそれをf_2とすると，f_2/f_1倍に移動が拡大されます. したがって，パターンの代わりにこの位置信号スポットを検出して位置決めを行うことができます. これには前述のL形スリットをもつ位相差光電顕微鏡を利用することができます.

しかし，このスポットの強度はパターンの面内回転θと傾きϕ，ψ(図22参照)によって強い影響を受けます. そのためこの姿勢角を正しく修正しておく必要があります. パターンは直交する線条から成っているので，これに入射光を垂直に当て，その反射光をフーリエ変換レンズに通すと，その焦点面に十字線のフラウンホーフア回折像が生じます. そして，面内回転θをもって十字線は回転し，傾きϕ，ψによってこの十字線の交点が移動します. そこで，相互に直角な位置に置かれた四つのセンサをもつ回転円板をステップモータで回転して，回折像を回転走査し，図23に示す$\theta_1 \sim \theta_4$を求め，計算（ミニコン）により，θ，ϕ，ψを算出することができます. 四つのセンサは前記の位相差光電顕微鏡を構成しており，回折像の十字の枝をよぎるとき位置確認パルスを発生するようにしております. そのときの走査用ステップモータの駆動パルス数をカウンタで計数することによって$\theta_1 \sim \theta_4$が求められるわけです. 回転走査部の構成を図24に示します.

全体の光学系の構成を図25に，その外観を写真6に示します. 実験に用いたICパターンを写真7に，そのホログラムを写真8に示します. 位置決め用パターンはジンバル支持の載物台に置かれ，θ，φ，ψ調整用の各ステップモータにより微小に姿勢角が修正されます. この載物台はX，Yテーブルに固定され，各軸ステップモータとボールねじとでX，Y方向に微小送りされるようになっております. 表2に駆動部の仕様を，表3に姿勢角



(a) ホログラム作成

(b) 位置信号スポット発生

図21　ホログラフィを利用したパターン位置決めの原理

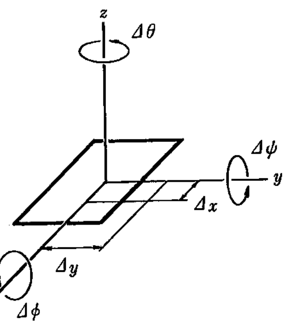


図22　パターンの面内回転θと傾きφ，ψ

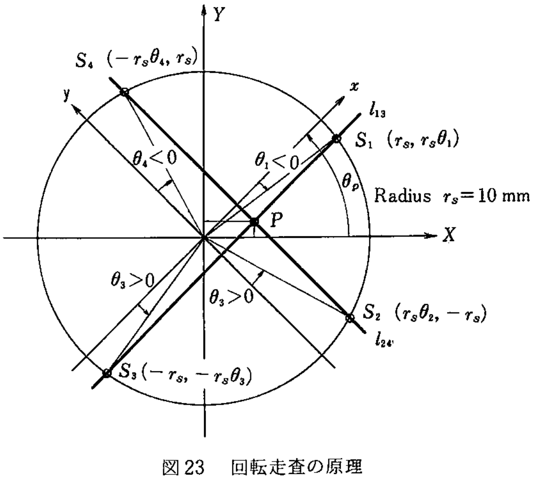


図23　回転走査の原理

修正の実験結果を，表4にY軸方向位置決めの実験結果を示します. これらはいずれもレーザ干渉計によって測定された結果を示しております. 剛性が足りない比較的ソフトな機構部にもかかわらず，かなりよい位置決め精度（20 μmの初期偏差のとき99.7 %の信頼率で±0.18 μm）が得られることがわかりました. この研究には清川

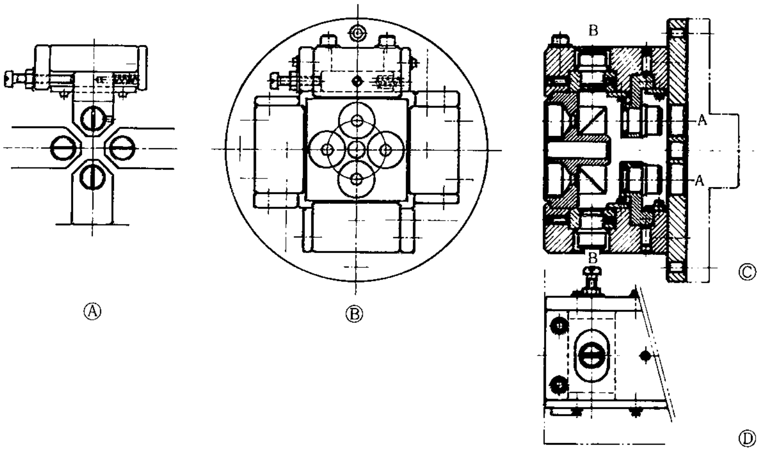


図24　回転走査部の構成

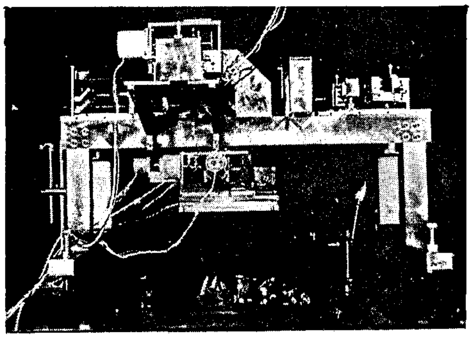


写真6　ホログラフィを利用したパターン位置決め装置の外観

写真8　ホログラム

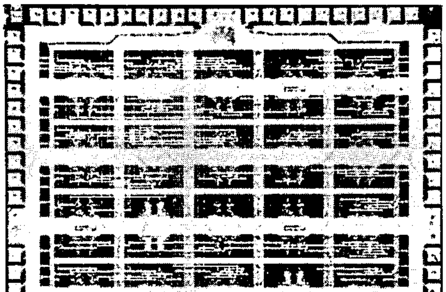


写真7　ICパターン

表2　駆動部の仕様

項　目	駆動ステップモータ 1パルス当たりの移動量	ストローク
θ	8 sec/pulse	±2.3°
φ	0.5 sec/pulse	±5 min
ψ	0.5 sec/pulse	±5 min
X	0.08 μm/pulse	—
Y	0.08 μm/pulse	—

表3　姿勢角修正の実験結果

	初期偏差（秒）	平均誤差（秒）	標準偏差（秒）	データ数
θ	415	3.57	18.46	11
ϕ	20	−0.17	0.22	11
ψ	20	0.08	0.23	11

表4　Y軸方向位置決めの実験結果

初期偏差（μm）	平均誤差（μm）	標準偏差（μm）	データ数
22	0.007	0.06	30
55	0.005	0.12	30

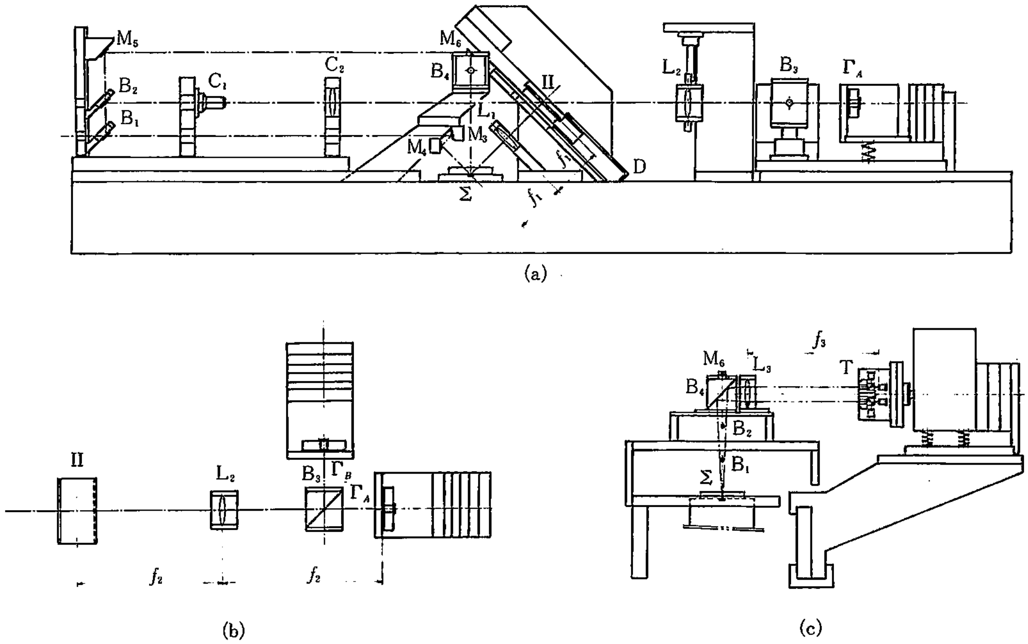


図25　全体の光学系

盛雄，毛利尚武君らの協力を得ました．

以上38年間にわたる私の研究生活を回顧いたしましたが，よい環境に恵まれて快適に研究を行うことができましたことを大変幸運に存じております．しかし，時代を先取りして問題に挑戦することが，国家・企業・個人いずれにとっても重要であることを最後に強調して私の講演を終わることにいたします．

(1980年5月7日受理)

引 用 文 献

1) 大島：精密機械，**15**, 10, 215-221, 1949
2) 大島：時計とレンズ，**1**, 2 (3月号), 4-11, 1951
3) 大島：精密機械，**21**, 2, 45-49, 1955
4) 大島：精密機械，**21**, 3, 102-107, 1955
5) 大島：精密機械，**21**, 7, 254-260, 1955
6) 大島：精密機械，**21**, 9, 345-352, 1955
7) 大島：精密機械，**21**, 13, 513-519, 1955
8) 大島：精密機械，**23**, 7, 315-323, 1957
9) 大島：精密機械，**16**, 3, 83-88, 1950
10) 大島，富成：自動制御，**1**, 2, 93-97, 1954
11) 大島，富成：自動制御，**3**, 4, 221-228, 1956
12) 大島：自動制御，**4**, 3, 198-204, 1957
13) Y. Oshima : Preprint for Congreso Internacional de Automatica (Madrid), 1958
14) 大島，木村，亀井，真鍋：精密機械，**33**, 12, 809-814, 1967
15) Y. Oshima, K. Kimura and T. Manabe : Proc. of 3rd IFAC Congress (London), 1966
16) Y. Oshima and I. Egawa : Proc. of 1st IFAC Congress (Moscow), 1960
17) 大島，江川：計測と制御，**2**, 8, 580-587, 1963
18) 大島，荒木：日本機械学会誌，**63**, 495, 584-592, 1960
19) Y. Oshima, E. Kikuchi, M. Kimura and S. Matsumoto: Proc. of IFAC Tokyo Symposium, 1965
20) Y. Oshima and Y. Matsumoto : Proc. of 2nd International JSME Symposium, Fluid Machinery and Fluidics, 1972
21) 大島，木下：計測自動制御学会論文集，**8**, 1, 24-30, 1972
22) Y. Oshima and O. Kinoshita : Proc. of 6th IFAC Congress (Boston), 1976
23) Y. Oshima and O. Kinoshita : Fluidics Quartery, **8**, 4, 64-84, 1976
24) 大島，毛利，中川：生産研究，**28**, 3, 158-165, 1976
25) Y. Oshima, N. Mohri and Nakagawa : Proc. of IFAC Symposium on Environmental Systems Planning, Design and Control (Kyoto), 1977
26) 大島，荒井：生産研究，**29**, 3, 182-185, 1977
27) 大島，荒井，能瀬：生産研究，**29**, 11, 648-651, 1977
28) Y. Oshima and B. S. Chang : Proc. of 4th IFAC Congress (Warsaw), 1969
29) Y. Oshima, Y. Matsumoto and K. Okamoto : Proc. of IMEKO VI Congress (Dresden), 1973
30) Y. Oshima and B. S. Chang : Proc. of 5th IFAC Congress (Paris), 1972
31) Y. Oshima, N. Mohri and Y. Isogai : Proc. of IFAC Symposium on Information-Control Problems in Manufacturing Technology (Tokyo), 1977