

光の干渉・回折とその応用

——故久保田廣教授と応用光学——

Application of Interference and Diffraction of Light.

——Review of Scientific Works of Professor Hiroshi Kubota in the Field of Applied Optics——

小 瀬 輝 次*

Teruji OSE

故久保田廣教授の多くの業績の中から光の干渉、回折の研究にスポットをあて、同教授のこれらの研究の進め方を通して物理学としての古典光学が近代応用光学に脱皮していった過程を解説した。

1. ま え が き

応用物理とか応用何々と応用という文字が純粋学問の上面につけられている研究分野は多いが、その応用の意味はその学問の単なる枕ことばで意味はないという人もいる。久保田教授は光学の上に応用という文字を冠した創始者である。これについて同教授の論文を引用すると応用物理学会誌 21 巻 7 号の説苑では「光学はきわめて古くから発達した学問の一つで古典物理学の典型的なものとされており、もはや一応研究しつくされた感がある。その光学が何故に再びこのように盛んになったのであろうか。それは純粋の物理学としてではなく応用物理学の一部門として生きかえてきたからである。たとえば光の回折はその波動性の証明のためにではなく、位相の遅速を明暗のコントラストに変える位相差顕微鏡の原理に應用され、光の干渉もその波長の決定ではなく、干渉フィルタという物理光学的なフィルタを作るのに應用されている。……これらのことは古い学問でもよくこれをかみしめて認識を新たにすれば新しい分野が開かれることを如実に示しているのである。」また日本物理学会誌 15 巻 5 号の学生会員のためにという中でも「光学は光の本質に関する探究は一応終え、これを利用して物質の本性を探ろうという方面——分光学、物性光学と、應用面を開拓しようという應用光学の二つになって伸びている。ここで應用というのは、基本原理にさかのぼりその中から實用になることを見いだすという学問の一つの分野というので、安易な工夫や思いつきを指すのではない」と述べておられる。この二つの論文は同教授の應用光学への心がまえを述べたものであつて、純粋物理での光学から應用物理の光学に移行することによって始めて光学自身がよみがえり得ることを示したものである。事実、光学はこれによって新しい発展の糸口を見いだし、今日の隆盛を見たわけである。この時代からそろそろ 20 年たった現在では、同教授の引例の位相差顕微鏡はホログラフィとか 2 次元のアナログフーリエ変換器、干渉フィルタはレーザ共振器とかビートの手段と書き直した方がよ

りびったりするほどに光学自身の体質が成長し変化してきている。この成長にはいまさらながらおどろくのであるが、これがすべて同教授の洞察力の深さと指導的な研究のたまものであったといっても過言ではない。

昭和 9 年東大理学部物理学科を卒業、理化学研究所で分光学の研究を開始された時点では、おそらく教授は純粋物理学としての光学を専攻されるつもりであったと思われる。しかし昭和 14 年から第二工学部に来られるまでの 3 年間、陸軍造兵廠で光学機械の研究に従事され学問と技術の結びつきを身をもって体験されたことが、後年光学の発展の道を應用光学に見いだされた原因ではないかと思われる。これは日本の光学界にとってまことに幸運であったといわねばならない。

同教授の研究業績は非常に多岐であり、干渉計の應用研究、干渉薄膜の研究、色彩論の應用研究、偏光顕微鏡、位相差顕微鏡の研究、レンズ収差の研究、レスポンス関数の研究、レーザの光学への應用研究などにわたっている。これらの研究の中から実際に利用されているアンバーコート、補色鏡、ダイクロイックミラー、鋭敏色板、レスポンス関数測定機等が生まれている。しかしこれらの研究成果の源をたずねてみると上述の久保田教授の言葉どおり、古典光学における干渉・回折の理論の應用と幾何光学であることに気づく。以下中心を干渉・回折の應用において同教授の業績を偲びたいと思う。

2. 光の干渉の應用

1) 干渉計の研究

元陸軍兵廠の工場長であつた柴弘人氏のお話によると、昭和 14 年当時造兵廠にはドイツより輸入した光学測定機が多数設備されていたがこれを活用できる人がいなかった。久保田少尉が応召勤務されたのを機会にこの活用を命じたところ、少尉は一人では無理であるとのことで東大の真島正市先生に囑託になっていたが真島先生の指導で仕事を開始されたとのことであった。

光学ガラスは目で見て脈理、泡等のないものを選別して製品に仕上げる。ときどき原因不明の不良品がでるところから、この解明に干渉計による検査法を提唱したのが

* 東京大学生産技術研究所第 1 部

教授の応用光学としての仕事の始めである。脈理とはガラスの内部での屈折率 n の不均質性であるが、目に見える脈理とは、ある断面内での単位面積あたりの不均質性を Δn として $\Delta n/ds$ (ds : 面積) の大小でさまる。それで Δn が大きくても ds が大きければあまり目だたない。ところが光学系にとって実害のあるのは $\int \Delta n ds$ であるから逆に Δn が大きくても ds が小さければよいが共に大きければ害も大きくなる。このことは糸状脈理は目に見えやすいが害は少なく、大きな面積にわたって屈折率が徐々に変化する脈理は目には見えないが害は大きいということになる。ガラスの材質検査には比較的簡単であるからシュリーレン法がよく用いられるが、これは $\Delta n/ds$ を見るので目で見にくいものはシュリーレンでも見にくい、一方干渉計は $\int \Delta n ds$ を観測できるからガラス材料検査にはこれが最もよいということになり、トワイマン・グリーン型の干渉計の使用を提唱された¹⁾。同教授は脈理の検査ばかりではなく干渉計の利用の拡大²⁾をはかられ、レンズの収差測定、シュミットカメラの補正板の形状測定、結晶軸の方位の決定、干渉膜の厚さの測定等にこれを応用された。

干渉計でコントラストのよい干渉縞を得るにはコヒーレンシのよい光源にしなければならない。低圧水銀灯などを用いる場合、干渉計の調整のコツはいかにしてコヒーレンシをよくして測定するかにかかっている。昭和 38 年頃よりレーザの出現で時間的コヒーレンシは飛躍的に改善され、たとえば水銀灯では数 mm の可干渉距離が、レーザではモードの選択によっては数十 km にもなるというので干渉計の調整ということとはほとんど不要になってしまった。同教授はレーザの干渉計への応用³⁾をいち早く考えられ、機構の単純化、特に長い距

離間でのくりかえし反射を行なわせ干渉縞の幅をせまくする、いわゆるマルチビーム法の試みを行なった。またレーザを用いると顕微鏡の中でも最も精密さを要求される干渉顕微鏡も機構ならびに操作が簡単になるので、レーザ用の干渉顕微鏡を試作しその性能テストを行なった。図 1 は本所の特別研究費で試作した鏡の切り換えによりライツ型にもリニックス型にもなり、また透明物体、反射物体でもさしつかえない万能型のレーザ用干渉顕微鏡である。

2) 干渉薄膜の研究

久保田教授の干渉の研究で、今一つの大きな業績は干渉膜の研究である。その発端は反射防止膜の研究である。反射防止膜は第二次大戦中すでにドイツでは実用化されていたが、この研究が国際的にも飛躍的に発展したのは戦後であった。ガラスの上の薄い透明膜に光をあてると膜の上面からの反射光は膜を通過し下面で反射し再びもどってくるいわゆる裏面反射光と干渉する。膜の屈折率を適当にえらぶと上面下面の反射率は自由に変えられ、膜の厚みを適当にえらべば両者の位相差を適宜に変えられるので、干渉結果の光の強さを強めることもできるし弱めることもできる。弱める場合が反射防止膜である。一方透明膜は吸収がないから透過光量と反射光量の和は常に入射光量に等しい。このような特色をもつ薄膜を多数層重ねると干渉効果を一そう高めることができる。特に反射膜としては多層膜にすることにより金属面よりもさらに高い 100% の反射率をうることも可能で、現にレーザ共振器の反射膜はすべてこの多層膜が用いられている。同教授は三層膜で反射・透過がそれぞれ 50% の半透膜の研究⁴⁾を行ない、これは干渉計のビームスプリッタ、カメラの二重像合致式距離計に応用されている。

この膜は白色で見ると透過光と反射光は互いに補色となるので補色鏡といわれている。ここで透過光、反射光に色がつくのは光の干渉の位相条件が波長の関数であるからである。反射鏡としてはできるだけ波長によらず一定の反射率をもつもの、逆に特定の波長だけを強く反射するものが目的によって要求されるけれども膜の屈折率、厚さの組み合わせでこれらは自由にできる。それでカラーテレビ用の三色分解フィルタのように撮像管の分光感度、受像器の蛍光体の発光スペクトルを考慮して、もっとも広い範囲の色再現を実現するための三色分解フィ

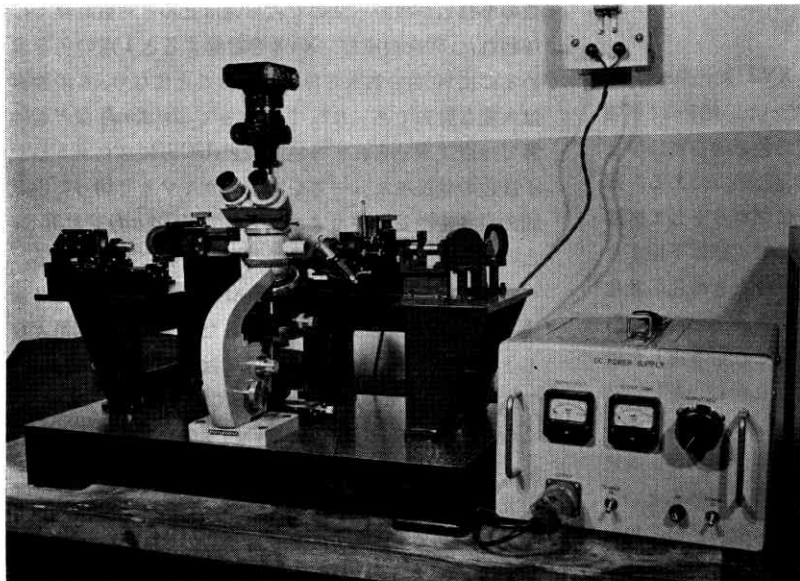


図 1 レーザ用干渉顕微鏡

ルタは多層膜の特色を用いるのがもっともよいことになる。しかもこの場合反射光と透過光が補色の関係を利用するとフィルタは2枚ですむ。同教授はこのような観点からこの試作に努力をされ大きな成果をあげられた⁵⁾。干渉は光の波長の制限はないからよい膜の物質を得られれば紫外、赤外領域で任意の分光特性をもつフィルタが作られる。赤外線のみを反射するコールドミラー、あるいはこれを透過するコールドフィルタなどが考案され実用化されている。反射防止膜としては不均質膜を用いたものが研究された⁶⁾。不均質膜とは膜の屈折率が厚さ方向に変化する膜のことである。この膜の境界の反射率は境界での屈折率のみが一次近似できいてくるので単層膜でも膜の上面、下面の屈折率が独立に利用できるので屈折率のえらび方に自由度が増し、単層膜よりも良い反射防止が可能になるわけである。

以上のように薄膜の干渉は非常に広い応用範囲をもっていたので、同教授は理論的研究のほかには膜の製法、膜厚の測定、膜の材料の研究等、幅の広い研究を進められた。このうちで膜厚の測定はおもに前述のトワイマン干渉計を用いる方法であったが、後にはトランスキーのマルチビーム法が多く用いられた。またチャンネルスペクトルを用いる方法、偏光を用いる方法などの各種の測定法の研究を行なった。しかしこれらはできた膜についての測定法であって製作中の膜厚のコントロールには用いられない。今では種々の方法があるが当時は実験室でもまた工場の現場でも目で干渉色を見てコントロールするのが普通であった。膜厚と色との関係はニュートンの「光学」にあるニュートンリングの色の研究が唯一のたよりであった。この干渉色を色彩論を用いて定量的に表示しようという考えがこのような環境の中で芽ばえ、次に述べるような今一つの研究の糸口となったのである。

3) 色彩論の応用

色の物理的な表示——C. I. E. の XYZ 表色系——の研究は1937年頃すでにほぼ確立していた。昭和22年頃には日本に二、三の解説書がある程度で色彩論を物理学という立場で取り扱ったのは同教授がはじめてである。薄膜の干渉色と膜厚の関係を色度図上にプロットして客観的にこれを表示したわけである。図2の実線は下地より屈折率の低い膜を順次に厚くつけていくときの色の変化を示したものである。図2のローカスは膜の内部のくりかえし反射は無視しているが、さらにこれを考慮した場合、斜め入射の場合等を研究した⁷⁾。しかし、もしこれのみで終わったのならば単なる一つの試みにすぎなかったかもしれない。それは、たとえば反射防止膜の赤紫色は色度図上の $x=0.2965$, $y=0.1224$ の点であるというのみであるからである。ところが当時反射防止膜の色むらというのがメーカーでは問題になっていた。一度に多数のレンズに反射防止膜をつけると皆同じ干渉色にでき

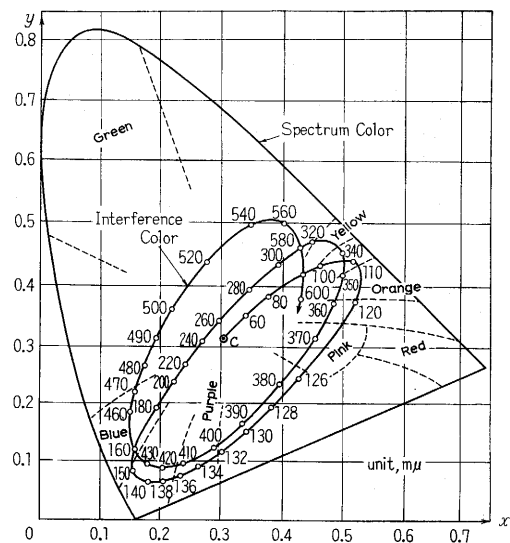


図2 干渉色の軌跡

ないというのである。またもともと色は主観的なものであり、注文者から赤紫色というだけで作るものであるから色のちがいによるクレームもまた非常に多かった。特に赤紫色付近は色むらができやすい。この原因の追究ということで膜厚 nd に対する色変化率 $\Delta s/\Delta(nd)$ を求め、これの大きい膜厚は色むらができやすいということから、赤紫色はちょうど色感度の高いところで、青か赤よりもわずかならせば反射防止効果はほとんど変わらず色むらが避けられることを指摘した⁸⁾。ところで一次の干渉色、二次の干渉色についてこの色感度 $\Delta s/\Delta(nd)$ を求めると一次の方が倍も感度が高いことがわかった。これが次の鋭敏色の研究の出発点となったものである。当時計算機といえば手動のタイガー計算機であり、三角函数表は対数のそれしかなかったので計算はほとんど対数計算で行なわれた。30撰座標でXYZを計算すると1点の色を求めるのに90回の対数計算を行なうことになり、この計算は大変な努力であった^{*}。したがって $\Delta s/\Delta(nd)$ なども計算では直接求められず等色度図表(UCS)にプロットした干渉色の軌跡にヒューズをあて、カミソリで切って色点間の長さを測るというような方法で $\Delta s/\Delta(nd)$ を計算し、というより測定して鋭敏色を見つけられたわけである。

干渉色の研究は膜厚のコントロールという意味で2層膜、3層膜⁹⁾の干渉色が計算された。またレンズ系となると多数の反射防止膜が結果的には重ね合わさるので、フィルタ効果が強化され画像に色がつくようになる。このため色のなるべくつかない膜厚の研究¹⁰⁾も行なわれた。さきに赤紫色の反射防止膜といったが、これは眼の分光感度に対してもっとも効果のある反射防止膜であり、写真フィルムの分光感度に対してはコハク色(113

^{*} 後に電子計算機を用いて check 行なったが数年間の計算がわずか1時間たらずであった。

～118m μ)¹¹⁾ がよいことを見だし、これはアンバーコートといわれ現在も広く写真レンズの反射防止膜に用いられている。

4) 鋭敏色の研究

偏光子と検光子との間に複屈折板(雲母とかセロハン)をそう入すると、常光線と異常光線との間で位相差(retardation)が生じるので互いに干渉し、白色光で見ると干渉色を示す。これを現色偏光という。この干渉は前述の薄膜の干渉でくりかえし反射を考えない場合と等しいから、薄膜の干渉色の結果がそのまま現色偏光に応用される。前述の一次と二次の干渉色は今の場合平行ニコルで retardation π の場合と直交ニコルで retardation 2π の場合に相当する。したがって感度は図3のように前者が後者の倍もあるということになる。図の ε はセ

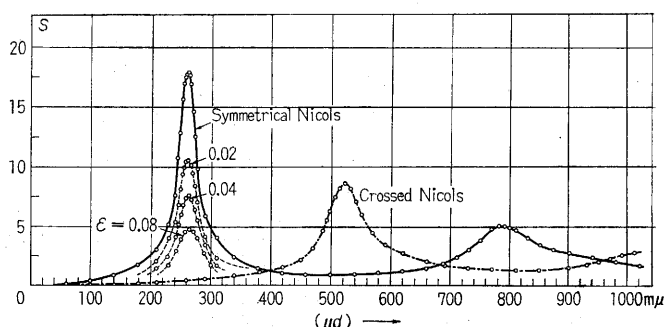


図3 鋭敏色板の感度

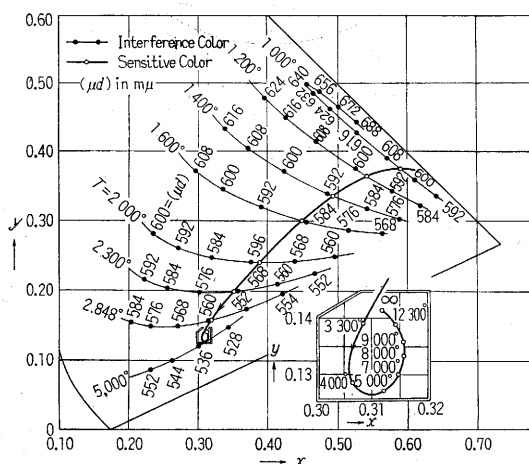


図4 色温度を変えた時の鋭敏色

ッティングにより干渉のコントラストが低下するために生じる感度低下を示している。このような retardation 板は鋭敏色板¹²⁾といわれ(前者は $\lambda/2$ 板、後者は λ 板という)ごく微少な複屈折を検出する時に用いられる。もちろん鋭敏色板は昔から用いられているが、いずれも経験的なものであったので厚みもまちまちであったが、同教授の研究ではじめてこの厚みが決定されるとともに、平行ニコルで $\lambda/2$ 板という新しい感度の高い鋭敏色板が

見つけられたわけである。これは現在も久保田プレートといわれ偏光顕微鏡に用いられている。図4はなぜ昔の鋭敏色板の値がまちまちであったかを調べるために光源の色温度を変えた時に感度最大の retardation がどう変わるかを調べた図で、太い実線が色に温度対する鋭敏色板の retardation を示す。これから原因は光源の差であったことがつきとめられたのである¹³⁾。

λ 板と $\lambda/2$ 板の中間の鋭敏色板はないかという研究が次に行なわれた。すなわち任意の retardation をもつ結晶板を鋭敏色板にできないかという問題である。これには波長に無関係な位相板を付加すればよいことがわかり、鋭敏色の感度は位相板の位相の与え方で非常に大きくできるので、超鋭敏色板¹⁴⁾と名づけられた。このような位相板は全反射の時の位相変化や魚眼石を用いれば得られる。魚眼石は分散が波長に比例するというめずらしい結晶であるが、実用になるほどの大きい天然結晶がないことが欠点である。そこでフレネルロームを利用した。ただこれでは連続的に位相を変えることはできず現在でも宿題になっている。波長に無関係な位相板に分散を考慮すると金属の上につけた薄膜の干渉色になる。これは任意の膜厚を鋭敏色で測定できる一つの手段となった。

3. 光の回折の研究

久保田教授の回折の取り扱いはいげんすの原理にもとづき二次波の干渉という考え方が基本であった。この意味で同教授は干渉と回折は同一のものと見なしておられた。格子の回折の応用¹⁵⁾として Cross grating の回折像を用いた網目の測定——いわゆる Missing order を利用した方法、スペクトル線の強度の測定にも grating と濃度楔を用い回折像が次数いくつのものまで見えるかということで簡単に測る方法なども示しておられる。分解能は通常二つの点光源の回折像の強度分布の断面で考えているが、実際目で見るとは二次元的な像として見るので、二次元の強度分布で定義すべきであるなどを指摘されている¹⁶⁾。また種々の形状の開口の回折像の研究は昭和20年頃の楔形¹⁷⁾の場合から始まりごく最近までたゆまずに続けられた。これらの研究は像改良の研究¹⁸⁾に、また最近の光のコヒーレンシの理論を考慮に入れた回折理論に発展している。本誌9月号¹⁹⁾に掲載されたピンホールの回折像で副焦点の位置を明らかにされたのも、従来の経験的なものを定量化した一つの例である。この論文は故鈴木嬢の計算を病床にあってまとめられたもので完成は6月末であり推敲は口述であった。同教授の絶筆となった。

このような回折の基礎研究から昭和23年頃の位相差顕微鏡の研究、昭和34年頃の偏光顕微鏡の研究が生ま

れた。位相差顕微鏡²⁰⁾の研究は終戦直後の文献の入手難の時代、その原理を同教授流に解析し、日本で試作に成功したものである。この解析によって位相板をどう用いればよいかという具体的な問題の解を与えることができた。また染色して通常の顕微鏡で見るのと位相差顕微鏡で見るのとの差異、すなわちシュリーレン効果がどうしても入るということが明瞭になった²¹⁾。たとえば細菌の鞭毛が2本に見えたからといってそのまま2本あると軽々に断言してはならないことをいましめている。

偏光顕微鏡の研究²²⁾は対物レンズ面に大きな角で光が入射する時、レンズ面の反射で入射面に直角方向とそれに平行な振動面をもつ光は振幅と位相が異なり、レンズの瞳面が一樣な平面波で照明されているとしたエアリーの回折像にはならず、瞳面の場所により吸収と位相のある場合の回折像になるというものである。計算結果図5のように四つ葉のクローバー型の回折像が得られ、実験でもみごとにこれを確かめられた。この研究は高倍率偏光顕微鏡が直交ニコルにしても中心が暗くならないという実際の問題からヒントを得られたもので、同教授が米国のロチェスター光学研究所におられた時の仕事である。計算は海をこえた日本で行なわれ、計算の指令と計算結果が大平洋を何度も往復したものである。この研究はより模型化され、また一般化され位相フィルタによる回折像の研究に発展し、Tallot の帯、Wolter の Minimumstrahlenkennzeichnung、屋根型プリズムの回折像などが統一的に取り扱えるようになった²³⁾。

キルヒホッフの回折積分は数式の上で開口の振幅分布のフーリエ変換であるから、回折像は開口の空間周波数に対するスペクトルである。このような空間周波数スペクトルの概念は、そのまま通信理論の時間軸を座標におきかえ光学に導入するとレンズ系は空間周波数に対するフィルタであるというレスポンス関数の概念になり、昭和

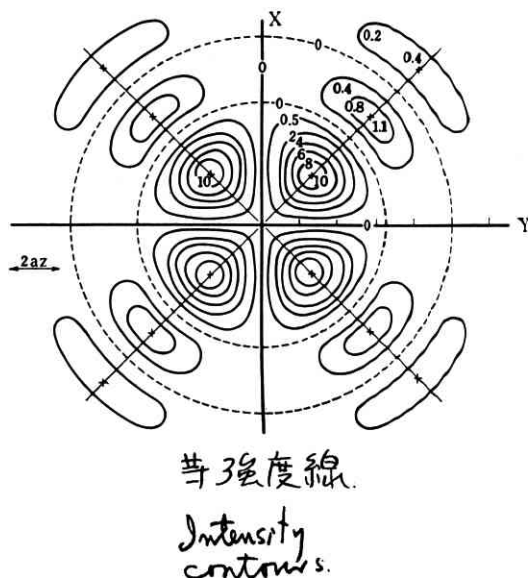
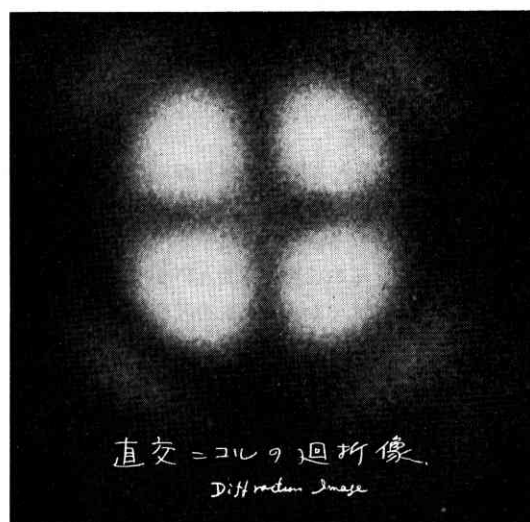


図5 偏光顕微鏡の回折像 (文字は久保田教授直筆)

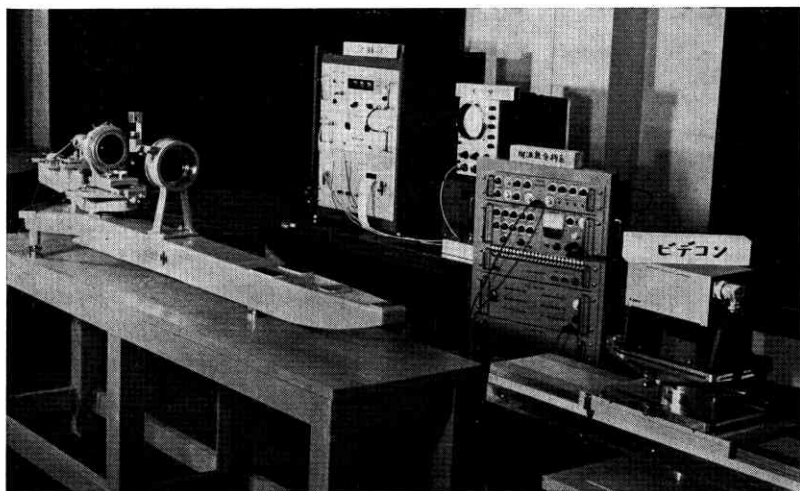


図6 周波数分析型レスポンス関数測定機

和28年以後レンズ評価法の新しい物理的手段として研究されたレスポンス関数の研究につながり、また20年前 Gabor が発明し4年前に Lieth, Upatnieks が通信理論を用いて発表し、現在話題になっているホログラフィもレスポンス関数の研究にごく自然につながっている。

レスポンス関数の研究は今まで述べてきた純学問的な研究とは異なり、同教授が推進者となり産学協同研究として積極的になされた研究である。レスポンス関数はレンズの設計データか

ら計算でも求められ、また実際の試作レンズについては測定もできるという特色のために新しい物理的な評価尺度になっているものである。同教授はスポットダイアグラムから計算で求める方法²⁴⁾を確立するとともにランダムチャートを用いた測定法²⁵⁾を研究する一方、測定機の開発研究を指導された。図6は本所の特別研究費で試作された周波数分析型のレスポンス関数測定機である。昭和39年日本で開催された国際光学連合の会議のとき、日本で試作した測定機5種を会場に展示し、同教授が日本の研究の紹介を行なったが、最近これらの測定機について精密な比較実験を行ない、測定機間の精度の検討を行なったところ誤差は5%以下であって、わが国の測定機の優秀性は世界一といってもよいことがわかった。同教授の指導の偉大さを物語るものといえよう。

4. む す び

以上の光の干渉、回折というもっとも基礎的な研究の中から一つ芽ができ、それが大きな枝となり多くの研究成果が生まれた過程を中心に、久保田教授の業績の一端をたどってみた。しかし同教授の業績ははじめに述べたように応用光学の創設とこれらの研究を通じ、応用光学の体質を徐々にしかも自然に古典から近代光学に改造してゆかれたことであろう。このためには同教授は総合報告を学会誌に掲載され、光学研究の方向についての指針を常に明らかにする努力をされた。たとえば昭和22年の「反射防止膜の発達」(I)(II)(応用物理学会誌)は薄膜研究の指針を与え薄膜光学研究の隆盛をうながし、昭和31年の「通信及び情報理論の光学への応用」(日本物理学会誌)は今日のレスポンス関数の研究の出発点となった。さらに昭和36年の「コヒーレンス理論の発展」(日本物理学会誌)、昭和39年の「光の喰り」(応用物理学会誌)、同年の「統計光学とコヒーレンス」(日本物理学会誌)の論文は電波望遠鏡、強度干渉計の解説を中心とし新しいコヒーレンス理論の重要性を指摘されておられる。これらは今後の応用光学の方向の一つである。

(1968年10月30日受理)

参 照 文 献

著者名のないものは久保田教授あるいは同教授の共著論文である。

- 1) 光学硝子における脈理の研究: 理研集報 20 (1941) 370
光学硝子における脈理の検査法: 応用物理 9 (1940) 459
板ガラスにおける脈理の研究: 理研集報 23 (1947) 720
- 2) 干渉計に依るレンズの検査および測定法に関する研究: 理研集報 21 (1942) 575
干渉計を用うるプリズムの検査および測定法について: 理研集報 22 (1943) 63
軸受球の干渉計に依る検査: 応用物理 12 (1943) 49
干渉計による非点収差の測定: 応用物理 12 (1943) 48
干渉計によるシュミットプレートの測定について: 応用物理 13 (1944) 26
増幅による光学硝子の侵蝕: 応用物理 13 (1944) 316
光学硝子の押型に関する研究: 応用物理 13 (1944) 317
光干渉計に依る結晶光軸の決定: 応用物理 15 (1946) 1
- 3) 朝倉利光他: レーザーを用いた干渉実験: 応用物理 34 (1965) 18

- 朝倉利光他: レーザー光の顕微鏡への応用: 生産研究 17 (1965) 219
- 4) 三層膜半透明鏡の応用: 生産研究 1 (1949) 85
写真機距離計の改良—三層膜補色鏡の応用: 生産研究 1 (1949) 38
- 5) カラーテレビに於ける色彩論の応用 (I) (II) (III): 日本物理学会誌 10 No. 6, 7, 8 (1955)
Dichroic Mirror について: テレビジョン学会誌 (1953)
- 6) 不均質薄膜による反射防止: 照明学会誌 34 (1950) 47
不均質反射防止膜の製作: 照明学会誌 35 (1951) 212
A Hard Efficient Reflection Reducing Coating. Sci. Light 2 (1953) 128
- 7) On the Interference Color of Thin Layer on Glass Surface: Jour. Opt. Soc. Am 40 (1950) 146
On the Interference Color of Thin Layer on Glass Surface: Jour. Phys. Soc. Japan 5 (1950) 10
The Table of Interference Color: 生研報告 1 No. 6 (1952)
On the Effect of Dispersion and Multi Reflection upon the Interference Color: Jour. Phys. Soc. Japan. 7 (1952) 470
反射防止膜の色について (I): 応用物理 18 (1949) 139
反射防止膜の色彩論的研究: 日本写真学会誌 11 (1948) 3
New Tables of the Interference Color: Proc. Japan Academy 36 No. 7 (1960)
- 8) 反射防止膜の色について (II): 応用物理 18 (1949) 247
On Sensitive Color: Jour. Opt. Soc. Am 40 (1950) 61
On Sensitive Color: Jour. Phys. Soc. Japan 13 (1950) 67
- 9) 三層薄膜の干渉色について: 応用物理 20 (1951) 139
Further Study on the Interference Color: Jour. Opt. Soc. Am 41 (1951) 16
- 10) 反射防止膜の透過光について: 日本写真学会誌 13 (1950) 23
- 11) 反射防止膜の色について (II): 応用物理 18 (1950) 247
- 12) On the Color of Chromatic Polarization: Jour. Phys. Soc. Japan. 6 (1951) 405
- 13) 鋭敏色について: 日本物理学会誌 5 (1950) 213
鋭敏色の色彩論的研究: 応用物理 20 (1951) 272
On the Sensitive Color of Chromatic Polarization: Jour. Opt. Soc. Am 41 (1951) 537
- 14) On Hypersensitive Polarization Colors: Jour. Opt. Soc. Am., 42 (1952) 144
Further Study of Polarization and Interference Colors: Jour. Opt. Soc. Am., 45 (1955) 89
現色偏光の干渉色の研究: 応用物理 24 (1955) 63
- 15) 回折による網目の測定: 応用物理 8 (1939) 401
回折による感光度の測定: 応用物理 11 (1942) 124
「組合せ回折格子」について: 理研集報 25 (1949) 51
- 16) 光学機械の分解能について: 応用物理 13 (1944) 87
- 17) 鋭い角を有する光源の回折像: 日本物理学会誌 3 (1948) 145
- 18) 朝倉利光: 振幅フィルタと収差の許容量 (英文): 生研報告 17 No. 2 (1966)
- 19) 故鈴木恒子: 小孔の回折像について: 生産研究 20 (1968) 455
- 20) 位相差顕微鏡: 日本物理学会誌 4 (1949) 158
位相差顕微鏡: 応用物理 18 (1949) 163
On the Effects of Errors of Micoid Disc in Polanret Microscope: Jour. Phys. Soc. Japan 7 (1952) 79
- 21) 顕微鏡における像の見え方: 位相差顕微鏡研究会誌 3 (1950) 8
- 22) Diffraction Image in the Polarizing Microscope: Jour. Opt. Soc. Am., 49 (1951) 191
Diffraction Anomaly in Polarizing Microscope: Nature 182 (1958) 1725
Further Study on the Diffraction Images in the Polarizing Microscope: Jour. Opt. Soc. Am., 50 (1960) 1020
偏光顕微鏡に結晶を入れたときの回折像: 応用物理 29 (1960) 691
- 23) 斎藤弘義: 光学系における異常回折像に関する研究: 生研報告 Vol. 9 No. 3 (1960)
- 24) On the Study of the Image of Photographic Lens by means of Spot Diagram: 生研報告 13 No. 2 (1963) 143
Einige Untersuchungen über die Übertragungsfunktion: Optik 17 (1960) 143
- 25) Method of Measurement of Response Function by means of Random Chart: Jour. Opt. Soc. Am., 47 (1957) 666
写真銀粒子の Power Spectrum について: 応用物理 26 (1957) 92
写真銀粒子の自己相関関数: 応用物理 26 (1957) 96
End Effect について: 応用物理 26 (1957) 135
Measuring Instrument for Optical Transfer Function: Japan. Jour. Appl. Phys. 4 Supplement 1 (1965) 137