



## OTF 研究の 30 年

Three decades of my studies on optical transfer function

小瀬輝次\*

Teruji OSE

OTF は光学の結像理論に新しい見方を与えたものであって決してレンズだけに限ったものではない。しかし日本の場合、これがカメラ産業と結びついて、敗戦後の日本の光学の発展の原動力となり、世界に例を見ない特殊な発展を遂げた。著者の OTF 研究から、このような経緯を振り返ってみたものである。

### 1. ま え が き

私は昭和 22 年 9 月第二工学部の精密工学科を卒業しました。卒業研究は共通第 2 教室の久保田広教授の元で偏心光学系の収差、特に偏心コマと偏心量との関係を求める実験的な測定をしました。卒業後は大学院生として久保田研究室に入りましたが、その動機は研究者を目指したというわけではなく、現在の留年学生と同じような気分といった方がよいと思います。大学院に 2 年在学し昭和 24 年 2 月からちょうど 1 か年間、神奈川県大船にありました大船光学に入社し、双眼鏡のレンズ設計をいたしました。海軍の 7×50 や陸軍の 6×30 の双眼鏡の設計データをもとに新しいタイプのレンズの設計を試みましたが、いくら収差補正をしても、これら軍の双眼鏡の補正まで達しなかったことを覚えています。このことはこの軍の双眼鏡は人とお金に糸目もつけず設計されていたことをよく示しています。

昭和 25 年 3 月第二工学部の講師となり共通第 2 教室で学部学生の応用物理実験の手伝いをいたしました。5 月には生産技術研究所が発足し私は 2 級技官になりました。以後 33 年間研究所にお世話になったわけですが、この間 18 年間は久保田広先生のご指導の元にあり、先生は昭和 43 年 57 才でなくなられ、私のように定年退官の記念講演もなさいませんでしたので、今日は先生の話も少し入れさせていただこうと考えております。

### 2. 戦後の日本の光学の黎明期

戦後の日本の光学研究には 3 つの波があったと思われる。私の経験した波は 1 つは昭和 20 年～27 年にかけての光学薄膜の研究、第 2 は昭和 30 年～35 年にかけての Optical transfer function (OTF) の研究、第 3 は昭和 40 年～50 年にかけてのホログラフィの研究でありま

す。

学問の世界での波というのは海の波と違って当事者だけに見えて、横から見えないものであります。そうはいっても客観的にも主要な学会誌の中の研究論文の数で一応は判断できると思います。光学の場合アメリカの光学学会誌 (Journal of Optical Society of America) 等から感じとられるのが上記の 3 つの波であります。

これらの波が日本に伝播してきた時間を考えてみますと第 1 の光学薄膜は 5～6 年、すなわち欧米では第 2 次大戦前から大戦中にかけての研究であり、第 2 の OTF は 2～3 年、第 3 のホログラフィでは約 1 年ぐらいであります。この欧米での波と日本での波との時間差はとりもなおさず日本の光学研究の後進性を示すわけで、しだいに減少しているのは、それだけ日本の光学界が先進国に近づいていることを意味し、戦後 30 年にしてようやく追いついたと考えるとよいと思います。

戦後なぜ光学がいち早く復活したかという点、私は 2 つの原因があったと考えています。1 つは戦後資源の無い日本が将来、貿易だけで 1 億に近い人間が食べてゆくにはまず精密工業の復活からということがありました。当時東洋のスイスを目指すとよく言ったものでしたが、スイスは単に平和国家という以外に時計に代表される軽工業立国を手本にしようというものであります。現実には鉄鋼、自動車、化学工業と重工業立国になってしまいましたが、軽工業の面でも、ミシン、時計、カメラ、など当時通産省もかなりその振興に力を入れた結果が現在、これらすべてが世界を制してしまうことになってしまったわけでありす。

今一つは光学の場合、戦前から光学兵器として研究、生産が軍の統制下にあったものが敗戦後民間の手に移り、自由競争のもとで研究、生産できるようになったということであろうと思います。もちろん戦後の一時期、軍の設計を我々が利用して食べていたわけで、大いに感謝しなければならないわけですが、それだけでは長続き

\* 東京大学名誉教授

はしません。私が大船光学にいた頃、海軍の7×50 (NOVA) をそのままのデータで、すなわち同じBK7 というガラスも厳密に言うと製作ロッドによって屈折率は小数点以下3桁目ぐらいでは違っているので、本来はそれに合わせて、レンズの曲率半径等は少し補正しなければならぬわけですが、そんなことをせずに一定の寸法で製作していたわけでありましたが、入社時1台24ドルぐらいでアメリカのバイヤーが買ったものが半年もしないうちに12ドル程度に買いたたかれるようになり、会社は給料の遅配、欠配で私は1年で逃げ出してしまったわけでありまして、日給月給6,000円から第二工学部講師になって月給8,000円に昇り、かつ公務員には遅配、欠配のないことに安心したことは今でも忘れません。もっともこの時だけということをおしそえておきます。

### 3. 私 の 研 究 歴

私の研究歴を振り返ってみますと、だいたい先に述べた波に乗っています。すなわち、昭和22年～28年までは光学薄膜の研究で、反射防止膜からはじまって干渉色の研究。昭和30年からはOTFの研究、主にその測定法、OTFを用いたレンズ評価、OTFの標準化の研究、これは今も続けています。昭和40年からはホログラフィの研究、その測定への応用からはじまり三次元ディスプレイの研究、もっともこれらの間にいろいろなのがチョビチョビ入りますし、昭和50年以後今一つほしいところがありました。けっきょくホログラフィディスプレイを続けることになってしまいました。

落語の登場人物には八さん、熊さんという職人、職人を二、三人使う棟梁、ついで長屋の大家とかご隠居があります。研究者の一生もこれに似ていて、はじめはなんでも自分の手足を使って研究を進める八さん熊さんの時代、委員会とか研究会を使つての研究、すなわち棟梁の時代、さらに好むと好のまぬとに拘わらずご隠居の時代があります。

昭和22年からの光学薄膜の研究は私としては馳け出し時代で八さん熊さんの時代であります。一方昭和40年以後のホログラフィの研究は皇太子が生研に行啓になる時、お目にかけようとして始めたもので、はじめから棟梁ですぐにご隠居になってしまいました。ここ10年程5月の生研公開には毎年いろいろのホログラフィディスプレイを展示してきました。ホログラフィ映画、リップマンカラーホログラフィ、カラーレインボーホログラフィなど、いずれも本邦初演あるいは世界初演のものばかりでありました。しかし、これは私の研究室の久保田敏弘助手が主となって院生や研究生と共に行った仕事であります。私は横から見ていただけであります。

この3つの時代をすべて経験したのがOTFの研究でありますから、以下OTFの研究に絞って30年を振り返

ることにします。

昨年は応用物理学会創立50周年の年であり、その分科会である光学懇話会の30周年の年でもありました。両方の雑誌にOTFの研究についての回顧記事を書きましたので、詳しくはそれらの雑誌を参照してほしいと思います。

### 4. OTF 研究の発端

昭和28年、日本が国際光学委員会 (International Commission for Optics (ICO)) に加盟するというので久保田教授は日本代表としてマドリッドの第3回総会に出席されました。このときの教授のお土産は2つありました。

1つはレンズ計算方式であります。当時日本は対数計算でこれを行っていました。レンズ設計は物点から出る光がレンズによってどう収斂あるいは発散されるかを光線のシュミレーションによって行うもので、この計算を光線追跡計算と呼び幾何学と屈折の法則だけで計算を行うものであります。屈折の法則は  $n$  関数でありますから計算機のない時代は三角関数表が必要で有効数字7桁以上を必要とする計算では Bremika の対数三角関数表が主に利用されておりました。ところがドイツでは Peter の真数表と電動計算機で光線追跡を行っていたという情報であります。今一つは OTF でこれがこれからの研究課題であるということでした。

レンズの計算法については前年 (昭和27年) に発足したばかりの光学懇話会がシンポジウムを開いたりしてドイツ方式の PR をし、Peter の真数表の海賊版を限定製作し各社に配り、この方式に切り換えました。これは数年後のリレー式計算機が光学計算に導入されるまでのつなぎ的役割を果たしたものであります。

OTF の研究は昭和31年に光学懇話会の中にレンズ性能研究委員会がスタートし、翌32年にはカメラ工業技術研究組合の中にレスポンス測定機研究委員会ができ、産学協同研究がスタートしました。

私は昭和30年頃より OTF 測定法の研究に入りました。OTF は現在光学分野ではすっかり定着した思想となりましたが、これは電気回路理論の時間軸を空間座標軸に置き換えたものですが、私たちにはなかなか入りにくい思想でありました。それは従来、光学の結像は空間座標のみで考えており空間周波数を導入して抽象的なこの周波数座標系で結像を考えるということは一つの思考の飛躍のようなものであります。レンズの点像あるいは線像の強度分布をフーリエ変換して得られる OTF、すなわちレンズの空間周波数フィルターとしての特性は光学レンズに新しい評価法を導入するとともに、今まで空間座標系で見られた種々の結像現象も別の観点から解決する方法を導いたものであります。レンズ評価法として

OTF の良さは

- 1) 客観的な評価ができる。
- 2) レンズがあれば測定できる。
- 3) レンズデータがあれば計算で求められる。
- 4) レンズを含む結像系がもし強度について線形である

と仮定できれば系全体の周波数特性は部分の周波数特性の積で求められる—Product rule—の4つであります。

ところで、測定はどうするか、計算はどうするか、被写体や写真フィルムの空間周波数特性はどんな様子なのかといったことがらには当時日本では全て白紙でありましたから、多くの光学研究者は喜んでこの分野の研究に飛び込んだわけでありました。

図1は昭和36年に私がはじめてOTF計算法、測定法の解説<sup>2)</sup>を書いたときに用いたレンズとOTFの関係図であります。当時OTFは我が国ではレスポンス関数と呼ぼうということになっておりました。

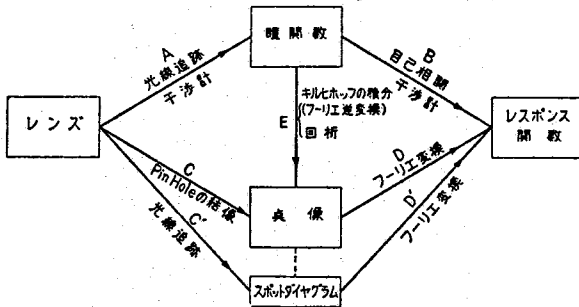


図1 レンズとレスポンス関数の関係  
図は J CRA Circular 1「写真レンズとレスポンス関数」,  
カメラ工業技術研究組合, 昭和36年10月より転載。

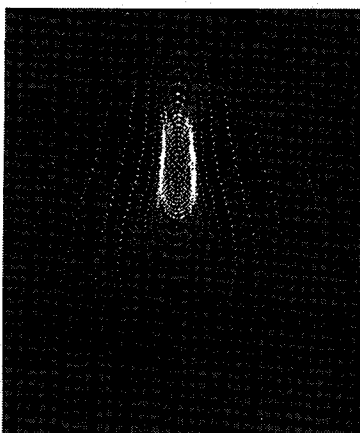


写真1 スポットダイヤグラム  
昭和36年に光学技術研究組合の計算センターが教育大光学研究所の1室に設置され、スポットダイヤグラムの計算機出力がはじめてブラウン管上に表示できるようになった。それまでは計算機出力のスポット座標は手書きでプロットされていた。

OTFは点像あるいは線像のフーリエ変換ですから、測定は物体としてピンホールやスリットを用いて被検レンズでその像を作り、これをフーリエ変換すればよいわけでありました。

一方この点像、線像はレンズの瞳面の振幅分布—これを瞳関数といいます—を回折積分すれば求められます。実際には、この図から回折積分は近似的に二次元のフーリエ変換ですから、レンズデータから光線追跡計算によって瞳関数を求めれば、あとはフーリエ変換を行うだけであります。しかし当時は電子計算機のない時代でしたから、言うは易く行うは難いことでした。それで今一つの方法、瞳関数の自己相関を求めるという方法で計算されました。

またレンズの瞳面を基盤目にわけて、その目を通る光線が像面を切る点をプロットすると写真1のような点の分布が得られます。これをスポットダイヤグラムと呼び、このスポットの分布は点像の強度分布を表しますから、これをフーリエ変換してOTFが求められます。このときのフーリエ変換は空間周波数を決めるとスポット座標できる sine, cosine の和となりますから簡単にできます。この方法はレンズ設計の段階で求められる方法として重要視されました。

5. OTF 測定の研究

a) 格子を用いるアナログフーリエ変換法

さて測定は点像あるいは線像のフーリエ変換をすればよいのですが、昭和30年代はアナログフーリエ変換しか方法はありませんでした。アナログフーリエ変換の方法は昭和1桁代頃より音響や電気分野で大変よく研究されておりまして、光学分野では20年後にこれらの研究成果を利用させてもらったわけでありました。

図2は測定原理の基本的な光学系を示したものであります。一次元OTFを測定する場合、物体として一次元格子を用い、被検レンズで、これを結像して格子像をつくります。この格子像のコントラストがOTFの振幅で像の横ずれがOTFの位相であります。

図2(B)は像面をスリット走査して格子像の強度分布を直接測りコントラストを求める場合であります。

図2(C)は物体としてスリットを用い、被検レンズでスリット像を作り、一次元格子でこれを走査して格子の透過光量の変化のコントラストを測定する場合であります。

写真2は私が昭和31年頃試作した1号機<sup>3)</sup>であります。格子としては扇形格子(ジューメンスター)を用いました。これは点像の走査と空間周波数の変化を独立に行うためであります。すなわち、格子の回転によって点像の走査をし、点像を格子の動径方向に移動させて空間周波数を変えます。写真3は約20年後私の基本設計で製

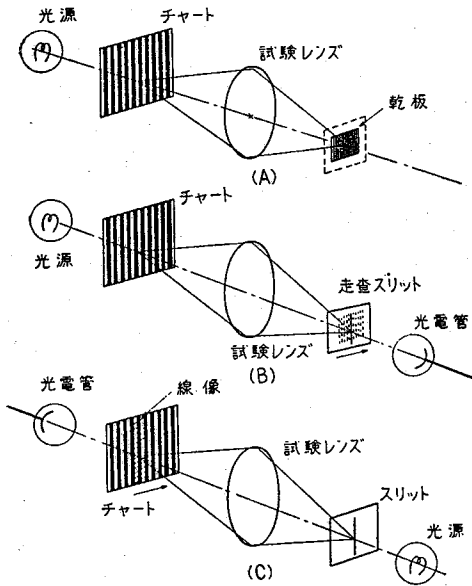


図2 測定法の原理

図はJCRA Circular 1より転載、当時は(A)のような写真法も実施されていた。(B)、(C)については本文に説明がある。



写真2 MTF直読装置

ジューメンスターの動径方向に点像を振動させ、それと同期させてブラウン管の水平軸を振り、ブラウン管の水平軸に空間周波数、垂直軸に点像の走査波形を画かしている。

作された日本光学製の測定機<sup>4)</sup>で写真機光学機器検査協会で現在活躍している装置であります。ジューメンスターは回転しながら横にスライドする方式であります。写真の2の第2世代の装置といってよいと思います。

平行線形格子(ロンキー格子)を2枚逆方向に動かして線像を走査し、それぞれの格子の透過光の和と差を取るようになりますと和からは線像のフーリエ coine 変換、差からはフーリエ sine 変換が求まりますから、その比を取りますと OTF の位相が求められます。格子を1枚しか用いない場合、OTF の位相は格子像の横ずれ量を測定

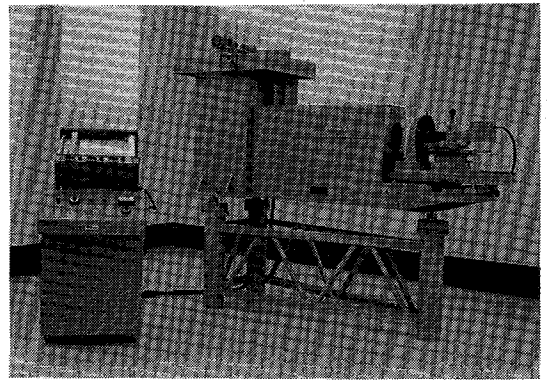


写真3 写真レンズの標準型 OTF 測定機

昭和47年7月、(株)日本光学製で財団法人日本写真機検査協会に設置された。以来内外の写真レンズ500本以上が測定され、OTF標準化のための貴重なデータが収集されている。

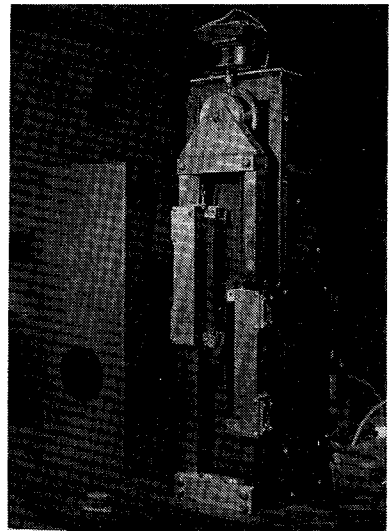


写真4 2枚走査チャート型 OTF 測定機(チャート部分)

2枚のチャートの透過光は、それぞれ別の光電管に受光され和と差が取られている。

することになりますが上記の比をとる方式がより精確に位相が測定できます。写真4は昭和33年頃生研の試作工場で作製したもので、私はツルベ式と呼んでいました。2枚の格子は上部の1つの滑車に釣り下げられ正しく上下すなわち逆方向にスライドします。写真5は前にお話した研究組合の費用で同年小坂製作所で設計、製作された装置<sup>5)</sup>であります。ツルベを横にして2つの滑車をスチールリボンで結び、それに格子を釣り下げて左右にすなわち逆方向走査を実現しています。

これを製作した昭和34年頃には研究組合の OTF 研究活動も盛んで、大阪工業試験所、NHK 技研でも測定機が作られ、とくに大工試の装置は改良されて C-4 型と稱

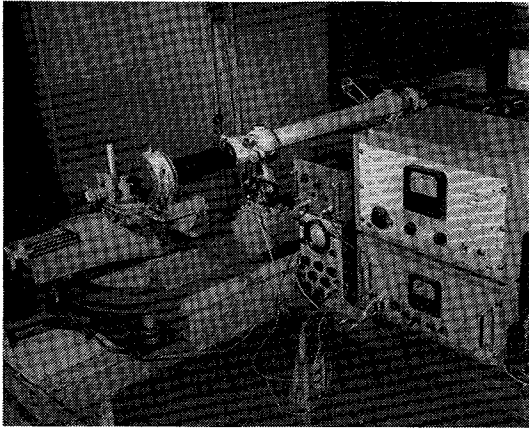


写真5 2枚走査チャート型 OTF 測定機

(株)小坂研究所製、2枚のチャートの透過光は交互にチョッパーされ、1個の光電管で受光され分波回路を経て直流成分は和、交流成分は差が取り出されるようになっている。

し、数台メーカーに供給され我が国の標準的 OTF 測定機となりました。

これから5年後の昭和39年に国際光学委員会のシンポジウムが東京、京都で開かれました。このとき東京会場では光学機械の展示会を開きましたが、その中に研究組合で試作した6台の OTF 測定機を一堂に展示し、今でいうポスターセッションを開きました。

我が国の OTF 研究は前にお話したように欧米に比較して数年スタートが遅れました。測定機については RCA が昭和27年に、パーキンエルマー社が昭和30年に、英国の BBC は昭和32年に TV レンズのテスト用に測定機を作りました。また西独ではそれぞれ光学メーカーが社内用の測定機を34年頃までに作っていました。

我が国は久保田教授が OTF の実用化研究として写真レンズの OTF に限って研究組合を中心に研究を推進し、ようやく昭和39年に欧米先進国に追いついたという状況であります。

#### b) 電気的アナログフーリエ変換法

アナログフーリエ変換に正弦波格子あるいは矩形波格子を用いるのは測定される空間周波数の範囲に制限を与えてしまいます。また使い勝手も良くありません。それで格子を用いない方式として線像を走査した電気的な出力をパルス列にしておいて電気的周波数分析器を利用しようとする研究は昭和30年頃から試みは始められました。この方式は装置は非常に簡単になりますが、位相の測定が面倒であります。そこで私は当時大学院生であった高島松雄君(現在キャノン)と協力して線像を往復走査してフーリエ coine 変換、フーリエ sine 変換を独立に測定する方法を開発いたしました。<sup>6)</sup> この研究は文部省の申請研究で行いました。写真6の装置の光学系は小坂

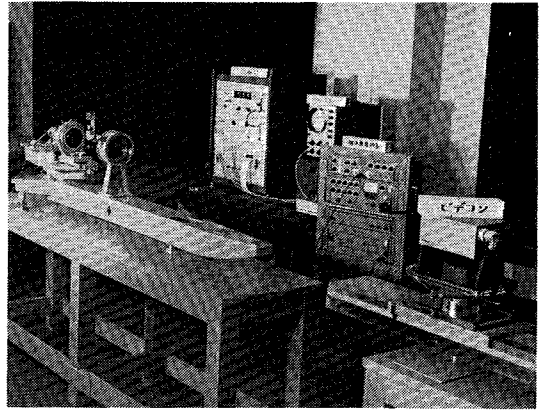


写真6 デジタル記録型レンズ性能測定機

ビデコンの水平走査を往復走査に変え、その出力を周波数分析してフーリエ Cosine 変換、Sine 変換をそれぞれ印字している。

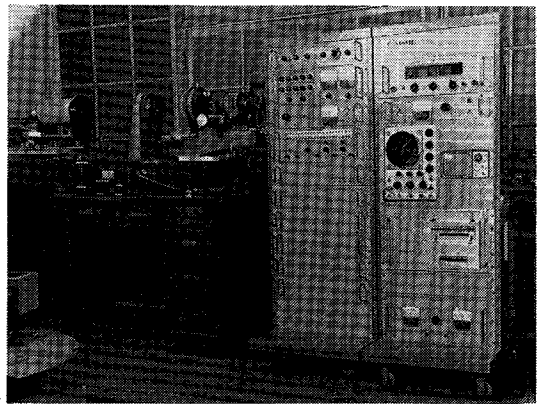


写真7 キャノンレンズアナライザ 1-A 型

(株)キャノン製、線像を光電管の前におかれたヘリカルスリットで走査する。光電出力は周波数分析されてデジタルに記録される。

研究所、電気系はキャノンで製作しました。線像の受光系にはビデコンを用い、通常の水平走査を改良して往復走査をさせました。水晶のフィルターを20個ならべ分析結果の OTF の出力はデジタル表示としています。その後同社では写真7のような分析系は同じですが走査方式を回転ヘリカルスリット方式にして通常の光電子増倍管を用いる装置を作っています。<sup>7)</sup>

これは数年後デジタルフーリエ変換方式に変わる前ぶれでもありました。昭和40年代に入りますと電子計算機はますます便利となり、クーリー・タキーの高速フーリエ変換のアルゴリズム (FFT) も出現し、フーリエ変換はデジタル計算機によるのが断然有利となりました。すなわち線像の走査を繰り返さず線像を数ミクロンをきに細かくサンプリングして、あとは計算機にかけてフーリエ変換して OTF を求めるという方式の測定機

が昭和44年頃から米国で試みられはじめました。

私が昭和47年在外研究員として米国に滞在中、ロチェスターにあるトローペル社をたずねたおり同社で製作していたミニスキャンの装置を見せてもらいました。これは線像をエッジで走査するものであります。

我が国でも昭和49年頃キャンノンでこの種の装置を作りました。同じ頃私の研究室では武田光夫君(現在電通大)がアダマール変換用の走査スリットを用いてデジタルフーリエ変換による装置<sup>3)</sup>をキャンノンの協力を得て作っています。

レンズ評価の場合、無限遠物体に対するOTFばかりでなく近距離物体に対するOTFも測定する必要がありますが従来のアナログフーリエ変換では格子の大きさに制約されて事実上実施不可能でありました。しかしデジタルフーリエ変換法では格子を用いませんので可能となります。近く完成する日本光学製の測定機ではエンコーダーで微小間隔のサンプリングをやり、すべてコンピューター指令で測定からデータ処理までやれるようになっていきます。

さらにキャンノンの朝枝剛君はCCDを受光器に用い、走査も電子方式にして投影テストに負けない速さでOTFを求め、レンズの全数テストをOTFを利用して行える装置を作っています。

## 6. OTFによるレンズ評価

OTFによるレンズ評価は昭和40年から数年間研究組合のレンズ評価法委員会の研究として行いました。これは佐柳和男氏のアイディアでテッサー形レンズの前玉の間隔を変えて球面収差の異なる5種のレンズを作り、これを用いて実写テストをし、感覚的なレンズ評価とOTFから導かれる物理的評価量との関係をしらべたものです。結果は残念ながら定量的なものは得られませんでした。従来、従来のレンズ評価法として用いられている解像力テストと投影テストに新たに単一周波数のOTFテストが加わったことを示しました。すなわち高空間周波数を用いると解像力テストに、低空間周波数を用いると投影テストにそれぞれ対応し、したがって中間の空間周波数を用いることが新しいテスト法として加えられることがわかりました。

ついで私のご隠居になってからの仕事としましては

1) OTFの標準化の研究, 2) 白色OTFの研究があります。

昭和46年頃英国のSIRA (Science Instruments Research Association, 初期は英国政府の補助でやっていましたが、現在は民間の会社組織となっています) が中心となって国際間で測定機のテストを行いました。これが以後の各国の標準化のはじまりであります。すでに英国・西独・米国・オランダ・NATO等で国内規格がで

きています。我が国でも昭和47年に標準化の研究をはじめ、昭和53年までにOTFの表示法、測定機の精度検定法等の規格案<sup>6)</sup>ができています。また測定機検定用の標準レンズも昭和47年に3個製作されています。

国際標準化機構 (ISO) も昭和53年にTC42 (写真) でOTFの規格化に着手し、昭和56年にはTC172 (光学一般) がスタートするに従い昭和57年にTC42とTC172のJoint working groupが作られNATO案を中心に検討が進められています。

## おわり

OTFは新しいレンズ評価法としてデビューしてから30年になりますが、レンズの良さを決める決め手とはなりませんでしたが、特定の空間周波数のOTFを監視することで、レンズの品質の均一化をはかることができるようになり、我が国の写真レンズの量産を可能にしたといつてよいと思います。そしてこれが今日我が国のカメラが品質と量で世界の市場を制してしまった原因といえると思います。

OTFの理論は前にお話しましたように線形回路理論の光学への導入でありまして、光学結像に対する新しい見方を与えたものであります。決してレンズだけに限ったものではありません。しかし我が国の場合、これがカメラ産業と結びついて世界にも例を見ない特殊な発展経路をたどったわけでありまして、後進国が先進国に追いつく手段としてこのようなうまい手段がいつもあるとは限りません。この点で我が国は大変恵まれていたということを感じました。

これからはデジタル処理の時代であります。これに応じて新しい回路論の光学への導入が期待されます。これが第2のOTF理論になって光学で花を咲かせるのではないかと思います。若い光学研究者にこのことを期待して私のむすびのことばといたします。

(1983年11月1日受理)

## 参考文献

- 1) 小瀬輝次, 応用物理, 51-517 (1982)
- 2) 小瀬輝次, レンズ性能研究委員会編, JCRA Circular 1 p. 15~39 (1961)
- 3) 小瀬輝次, 生産研究9-53 (1957)
- 4) H. Kondo, T. Watanabe and H. Yamaoka, Optica Aata 22-353 (1975)
- 5) 小瀬輝次, 東京大学生産技術研究所報告 vol 11, No. 4 (1961)
- 6) T. Ose, M. Takashima and I. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. phys. supplement 1-154 (1965)
- 7) 朝枝 剛, 渡辺朝雄, 光学, 3-140 (1974)
- 8) 武田光夫, 朝枝剛, 山口意胤男, 光学 3-347 (1974)
- 9) JOERA Circular 2 (1965), 3 (1975) [用語], 5 (1976) [表示法], 6 (1976) [精度検定], 8 (1977) [測定法]