

すばる望遠鏡主焦点光学系設計の思い出

成相 恭二

〈国立天文台名誉教授 〒181-8585 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: nariai.kyoji@nao.ac.jp



私が退官した年にすばる望遠鏡が完成し、その後まもなく主焦点カメラも動き始めた。プロジェクトチームの最初のメンバーの一人として主焦点カメラの設計にかかわったが、ハワイ島マウナケア山での建設が始まってから退官までは連絡役としてハワイ島にいたことになったのでカメラについての私の思い出もそこで止まっている。退官してから（すばる望遠鏡が完成してから）望遠鏡や主焦点カメラについて何回か話したり書いたりする機会があった。設計の思い出を書くようにと月報の編集部から依頼されて書きかけては見たが何しろ20, 30年昔のことである、書き始めるとすでに書いたものほとんど同じになってしまう。編集部の許しを得て昔の文章をほとんどそのまま再掲させてもらうことになった。天文学とは異なる分野の雑誌などに書いたものなので、月報の読者にはまだご披露していないことについての文だと思っている。

1. スタートライン：松居吉哉先生

日本の天文学者が使える大きい望遠鏡を作ろうと言う計画が始まったのは1980年代の半ばだった。東京天文台の光にかかわりの深い天文学者が中心になって準備を始めたが、当然光学設計も仕事のうちに入っていた。ところが、天文学者は光学器械を使うけれども作ったことがない。途方に暮れていたときに東京天文台の守山史生さんの口利きでキャンノンに光学設計のことを教えてもらいに行くことになった。日本の望遠鏡を作るのだから日本が世界に誇る光学会社に助けを乞おうと言うわけである。私が松居先生とお会いしたのは小平桂一、山下泰正、成相恭二の3人がキャンノンの荒哲也さんを訪ねていったときに打ち合わせに出ているのだったのが初めてである。それから20年余「すばる望遠鏡」のことでいろいろと教えていただき、またお世話になった。

荒さんのところにお邪魔したとき、私は松居先生が光学設計界で「神様」と呼ばれるような存在

であることは全く知らなかった。だから、その前の数週間をかけて行った「主焦点3レンズ補正系」の計算結果をもって行って得々と説明したのである。山下が3次収差論を使って3枚薄レンズ補正系の解析解を求め、成相がPC9800のBASICで書いたプログラムを走らせて何枚ものスポット図を描かせた物だった。荒さんが退席された後、松居先生は私たちの説明をゆっくりと聞き、それから設計の自動計算方法には減衰最小2乗法（DLS法）を使うと良いことを教えていただいた。また先生の御著「レンズ設計法」もくださった。Federによるskew rayの追跡公式もこのとき教わったように記憶している。

今から考えると、あの程度の計算の説明を「神様」の前でよくやったものだと思わずかしくなる。何しろ200行程度の成相自作のプログラムに入っていたのは反射の法則とスネルの法則だけだったのだ。薄レンズ解では格好がつかないとレンズに厚みを付けようとするのだが、一度に20 mmも厚くしようものなら解がとんでもないところに跳

んでいってしまうのだった。山下の解析解のほうがまだ程度は良かったが、8次方程式を解いて出てくる対になる解のスポット図を見ると片方が良いのに他方は悪い。なぜかわからない、と言う具合だった。これは望遠鏡のF値が2と明るいために5次以上の収差があるためだと教わった。

天文台に帰ってから自作のプログラムに3次収差係数やDLS法を組み込んだので、レンズ3枚の補正系を以前より楽に計算できるようになった。またプログラミング言語もTurbo-PASCALに変え、プログラムにはoptikと命名した。2,000行ほどのプログラムになっていたかと思う。こうして天文台でoptikを開発しながら使って計算をする一方で、時々下丸子のキャノン本社にお邪魔してキャノンのプログラムも使わせていただいた。プログラムに誤りがないかをチェックするほかに、専門家が使う光学設計プログラムを見て見たい、と言う気もあった。松居先生は作業の様子を見ていて、時折コメントをくださっていた。

ある頃から私たちの主焦点カメラ設計が「物になりそうだ」と判断されたのではないだろうか、光学設計部門の武士邦雄さんが私のキャノンでの作業に付合うようにしてくださった。optikはその後ワークステーションの上でC言語に書き直し、レンズ設計法にある5次収差も組み込んで4,000行ほどになった。

JNLT (Japanese National Large Telescope) を将来使おうと言う日本の天文学者たちは、広い波長域で広い天域を撮影できるような補正系が欲しいと言う。設計をする側としては、波長域が狭ければ楽だし撮影天域も小さければ何の苦労もないのにと思いながら、要望を満たすためにいろいろなことをやった。大きい非球面を使うとか、大きい低分散ガラスのレンズを使うとか、光学エンジニアの常識をもっている人ならやらないようなことである。焦点距離が15 mと長いうえにF/2と明るいために、小さい光学系ではあまり問題にならない球面収差の色収差を押さえ込むための苦肉

の策だった。非球面も低分散ガラスも最終的には武士さんの設計になってから形を変えて生かされたが、当時は松居先生も武士さんも肝を冷やしなげらのお付き合いだったのでないだろうか。

「光学」37巻7号より抜粋

2. 世界一になるための苦労

計画が始まって数年のうちに山下さんと私は将来のユーザーの要望に応えられるすばるの主焦点補正系を設計することができました。これは立派な成果だと考えられました。私たちはこの苦労の成果をたいへん誇りにしていました。突然、計画責任者の小平桂一が鏡の直径を大きくすることを決めたのです。最初の設計値は7.5 mでした。しかし当時世界では二つのほかの計画が合計六つの8 m級望遠鏡を作ることになっていたのです。ジェミニが二つ、ヨーロッパ南天文台が四つです。小平は私たちのすばるが世界の大望遠鏡の表で首位に立つように直径を大きくすることを決めました。もし大きくしなければ単一鏡としては第7位、ケックも入れると第8位になってしまうからです。そんなことは断じて許せません。

こうして鏡の口径は7.5から8 mになりました。文部省に承認されたのです。しかし小平の心配はなくなったわけではありません。もしほかの計画が自分たちの鏡を世界最大にするために「ちょっとだけ」大きくしたらどうしよう。技術的には難しくありません。コーニング社のULE (超低膨張ガラス) であれば最後のサグダウンの工程で余分に時間をかければ炉の中で5や10%は余分に広がってしまいます。そこで誰にも負けず世界一になるために、小平はすばるの鏡が有効径8.2 m、外径8.3 mと決めたのです。このことは文部省、大蔵省には内緒でした。予算獲得上問題があったからです。でも今は彼らも世界最大の単一鏡で大満足です。

この7.5から8 mへの変更のために私はまた働かなくてはなりませんでした。明るさで9%の増

加はどんな光学設計者にもきつい仕事です。難しい計算をしたり、そのことを考えながら長時間窓外に目を向けたり、した後ユーザーの要求と多少妥協させて設計を完了しました。この後、世界中で大望遠鏡光学設計の第一人者であると大得意だったのです。

しかし私の大得意は短命でした。キャノンの武士さんがプロの光学設計技術者としての魔法を見せてくれたのです。武士さんは私が完璧だと思った設計を改良してしまったのです。彼は大気分散補正板を新しい発明で置き換えて、より良い性能を小型化した補正系で実現したのです。私のデザインと武士さんの素晴らしいアイデアで新しいカメラが発明されたのです。設計に私の寄与もあったのでキャノンは特許出願者のリストに私の名前も入れてくれました。

このカメラはすばる望遠鏡の心臓です。私はたいへん誇りに思っています。

ハワイ島ヒロでの退官講演

“My Three Cameras” の和訳より抜粋

3. ADC：武士邦男さん設計の大気分散補正光学系

反射望遠鏡は視野が狭いのでレンズを何枚か使って広い範囲の写真が撮れるようにします。パロマーの200インチ望遠鏡や1970年代にできた3-4 m級望遠鏡のいくつかで設計、使用した例があります。国内の観測天文学者から「すばるでは焦点面で直径150 mmは使えるようにして欲しい」と言われていました。お月様くらいの面積を写せるようにしてくれ、というわけです。口径8 m, $F/2$ の超望遠レンズといえる大望遠鏡にとってはかなりきつい要求でした。私はお手製のソフトやキャノンのソフトを使ってその要求にかなうものを作り、世界一の補正系設計者であると鼻を高くしていたのです。ところがある日、会合が始まる前に武士さんが、「先生、こういうものを計算してみたけれど、どうでしょう。」とおっしゃ

るのです。小さなレンズを使っているのに私の設計よりはるかに性能が良いのです。私の鼻はいっぺんにペシャンコになりました。

星の光が空気の層を斜めに通ると、プリズム作用のために細長い虹になり、しかも虹の長さは天頂からの距離によります。補正系の中には可変プリズムでこれを逆向きに補正して星が点に写るようにする仕掛けがあるのですが、あなたは2種類の硝子による平凸レンズと平凹レンズを、球面を境にして貼り合わせ、その横移動が可変プリズムの役目を果たすことを利用したのです。設計パラメーターとして貼り合わせ面の曲率半径が一つ増えているので、補正系全体としても小型にしながら高性能化ができたのでした。「プロとは恐ろしい技をもっているものだ」というのがそのときの私の印象です。でも、武士さんは私みたいに自慢することもなく、淡々とその後の改良を続け、最後の完成にまでこぎつけたのです。現在は8千万画素のCCDと組み合わされてSuprime-Camと呼ばれ、数あるすばるの観測機のなかで最もよく使われています。

武士さんの思い出、平成4年

4. 失敗談：非球面、低分散ガラスの使用。羽部一郎さん

国内の天文学者コミュニティがJNLTLに寄せる期待は大きかっただけに要求もいろいろでした。「視野を広く」「暗い天体まで」、「単能に」「多機能に」、など相反するものもありましたが、主焦点カメラについての要求は、可視光の領域で、視野直径30'以内で像直径0.2"以内だったかと思います。その分野のユーザーを代表していたのは岡村定矩君（東京大学副学長）です。しかし、そのころ、私たち設計担当者は、視野端での像直径を0.5"程度より小さくするのが不可能とっていました。

光学では要求されたことを実現する設計が必ずできると言う保証はありません。一方で、ある条

件の下では不可能なことが、条件を変えると可能になることもあります。その見通しを立てることは容易ではありません。長いこと考えて苦心の末に、ユーザーの要求を満たすために考えついたのが直径300 mmほどの低分散ガラスFPL51と直径400 mmを超える非球面の使用でした。

これは計算上ではユーザーの要求を満たすことができる素晴らしいアイデアでしたが、製造の可能性と言う点では実現性の乏しいものでした。オハラ羽部さんによると、当時FPL51級の低分散ガラスは「世界で最大のものが直径100 mm程度」で「納期は1年」と言うことでしたし、大きい非球面研磨機も直径300 mmまでのものが文部省の特別研究によってキヤノンでようやくできたばかりだったのです。

しかし、「世界一の望遠鏡を作るのなら」とオハラ、キヤノンの技術陣が頑張ったおかげで、私たちの工夫は取り入れてあるものの、初期設計よりスマートで高性能のSuprime-Camが出来上がりました。

(以下加筆) 私が名案(迷案)を思いついたとき、光学の世界で可能なことの限界を私にどうやって認識させ、納得させることができるだろうか、と武士さんは悩んだのだろうと思います。そしてある日オハラの工場を見学に行くことになりました。そのときのオハラ羽部一朗さんの言葉は今でも忘れられません。「先生、FPL51のような低分散ガラスは(両手の指を使って丸を作り)世界最大のものがこれくらいなのです。しかもそれはドイツにあるだけです。でも日本が世界一の望遠鏡を作るのに必要だと言うのなら、(ドンと胸を叩いたと思う)やってみましょう。」そして時間も費用もかかる大型低分散ガラスの製作実験

を初めてくださったのです。その後このガラスは武士さん設計の主焦点補正系の中の1枚として使われました。

OpluE, 平成9年1月号より抜粋加筆

5. あとがき

「今は主焦点カメラではなくSuprime-Camと呼ぶのですよ。Subaru Primary Cameraの頭文字を入れた読みやすい名前でしょう。」と宮崎聡君に教えてもらったのも10年以上前のことです。Suprime-Camは私の期待を、いや日本中の天文学者の、それどころか世界中の天文学者の期待をはるかに超える働きをしました。ハッブル望遠鏡で見えるものはすべて見え、しかも視野が100倍もあることを喜んだのは序の口でした。弱い重力レンズ効果を検出する仕事などは私の理解あるいは期待をはるかに超えるものです。赤外領域の単色フィルターを使って宇宙の始まりに近い銀河を探すのは見事に成功し、チャンピオンデータを何回も更新しています。これは、理解できますがSuprime-Camの設計にかかわった私としては、全く想像もしていなかった成果でした。そう言えばSuprime-Camの設計では厚さ数ミリのフィルターをレンズの前につけるように頼まれていたような気がします。

Suprime-Camよりもっとよいものを、とすばる望遠鏡では9倍の視野をもつHyper Suprime-Camが作られて動いています。世界もSuprime-Camに触発されていくつもの広域撮像ができる観測機や専用望遠鏡まで計画、建設中だと聞きます。Suprime-Camの設計の最初にかかわったものとしてたいへん誇りに思っています。