

軽量な望遠鏡

栗田 光樹夫

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: mikio@kusastro.kyoto-u.ac.jp



せいめいの技術目標の一つとして「軽量化」が挙げられる。望遠鏡を軽くすることで高速駆動が可能となり、加えて建設費を抑えることができる。とくに前者においては、超新星など突発天体を素早く捕らえ、爆発現象の初期段階を解明することが期待される。この軽量化を実現するために、せいめいでは新しい望遠鏡構造を考案し、さらに遺伝的アルゴリズムによって、より軽くより変形が小さい構造になるように最適化を行った。その結果せいめいは国内最大の3.8 mの口径でありながら1分以内で任意の天体を捕らえることができる。

はじめに

本稿では冒頭に望遠鏡架台の特徴とその発展、とくに軽量化の歴史に簡単に触れ、その後、せいめいプロジェクトにおいて行った軽量化のための技術開発について述べる。

望遠鏡の役割は天体からくる微弱な光をより多く集光することであり、それを担うのが精密に加工された鏡である。したがって鏡を支える鏡筒に求められる性能は、鏡を歪めずに支えることであり、鏡筒を支える架台に求められる性能は、鏡筒を正確に目標の天体に向けることとなる。鏡に許される変形は、観測波長より十分小さい必要があり、100 nm以下となる。反射望遠鏡の場合、鏡の大きさはメートルサイズであり、質量は数百キログラムから数十トンにもなる。たとえば世界最大級の望遠鏡の1つである口径8.2 mのすばる望遠鏡の主鏡はたいへん薄く軽量の鏡でありながら23トンとなる [1]。このように重い鏡を歪みなく支える鏡筒と架台には十分に強固な構造が求められる、必然的に重くなる。

次章で述べるように望遠鏡の発展は軽量化の発展と言っても過言ではない。望遠鏡が大型化するとドームも含めて質量が増加する。味気ない話かもしれないが、精密機器である望遠鏡といえども建設費と総重量には強い関係がある。重量が増えれば、材料の調達から運搬、加工、組み立てなどすべての工程でそれに比例したコストが必要となる。

1. 軽量化の歴史

1.1 Meinelの挑戦

アリゾナ大学スチュワード天文台長などを務めたA. Meinelは1970年代に巨大マゼラン望遠鏡(GMT)につながる6枚の鏡からなる複眼望遠鏡(MMT)を検討していた。当時Meinelは、望遠鏡の建設費と重量はともに口径のべき乗に強い相関があることを指摘し、望遠鏡構造の軽量化と小型化に注力した [2]。Meinelの考案した6枚の独立した主鏡からなるMMTと一般的な望遠鏡の比較を図1に示す。彼の設計には大きく3つの工夫^{*1}が見られる。1) 短い焦点距離の主鏡(明るいF値の主鏡)により鏡筒を短くし、鏡筒とドーム

^{*1} アリゾナ大学のグループの試みとして軽量化に大きく貢献した技術としてハニカム軽量鏡も挙げられる。当時Angelらがポロシリケート系の硝材によりハニカム鑄造の研究を同時に進めていた [3]。

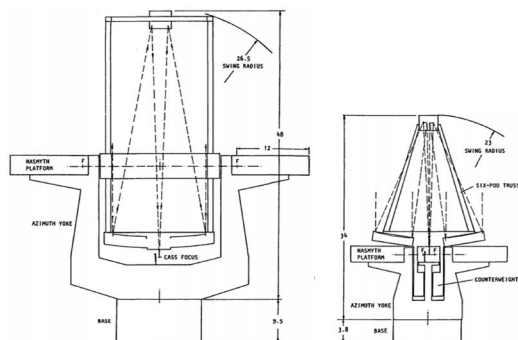


図1 左が主鏡F2.75の従来の望遠鏡。右がMeinelが提案したF1.0のMMT。どちらも主鏡の大きさと観測装置を支えるナスミス台が同じ大きさである。Reprinted with permission from Meinel (1982) [2] ©The Optical Society.

ムを小さくする。2) 電波望遠鏡のように高度軸を鏡の裏側に配置することで架台構造全体を小型で軽量化にする。3) 副鏡を支えるためにセルリエトラス^{*2}を用いず、6枚の鏡の間を通すように配置した六角錐をなす支柱を採用することでドームの小型化を図る。なお副鏡先端とセルリエトラスの外接円の差はわずかであるが、他の巨大望遠鏡でも同様の工夫が施されている。

1.2 主な軽量化技術

Meinelらアリゾナ大学の試行錯誤の一例を示したが、すべての望遠鏡に当てはまる小型化、軽量化の技術は大きく3つ挙げられる。それらは1) 経緯台、2) 明るいF値の主鏡、3) 軽量の鏡である。たとえば、1974年に完成したBTA (Большой Телескоп Азимутальный) の6 m望遠鏡では、従来の赤道儀の架台に代わり経緯儀が開発され、鏡筒を支える架台が大幅に小さく軽量化になった。この進化は優れたモータと計算機による制御技術で

実現した。

焦点距離が短く明るいF値の主鏡は鏡筒を短く軽量化にする。経緯儀と合わせてドームも小さくすることができる。明るいF値の主鏡はそれだけ非球面度が大きくなるため計測が困難だったが、干涉計をはじめとする計測技術や補正光学系の設計技術の発展によってもたらされた。

鏡の軽量化技術も望遠鏡本体の軽量化に貢献した。冒頭で説明したように、望遠鏡構造の役割は鏡を支えることだ。したがって、鏡が軽くなればその軽量化割合に応じて望遠鏡全体が軽くなることが期待され、その効果は絶大だ。具体的には薄型鏡を実用化したNTT (New Technology Telescope) の能動光学 [4] やKeck望遠鏡の分割鏡技術 [5]、アリゾナ大学などによるハニカム構造を実現したガラスの加工や鑄造技術 [3] が挙げられる。

2. せいめいの軽量化技術

せいめいも上記3つの技術をすべて取り入れて軽量化を図った。架台は経緯儀であり、主鏡F値も1.3と明るく焦点距離が短い。また18枚の分割鏡の主鏡の厚さは60 mm (最も薄いところは50 mm以下) と薄く、全重量は1.2トンである。これは、せいめいをすばると同じ口径8.2 mにスケールアップしたときに、鏡筒の長さで6 m短く、鏡の重さで17トン軽いことに相当する (鏡重量はすばる望遠鏡の1/4)^{*3}。つまり望遠鏡全体でこれまでの望遠鏡の1/4以下に軽量化できる可能性があり、ドームもそれだけ小さくできることを意味する。なお、すばる望遠鏡の鏡は能動光学を併用した薄型鏡であり、古典的な鏡に比べて1/4以上軽量化されている [6]。

^{*2} 主鏡と副鏡のアライメントを補正する構造で従来の鏡筒構造に用いられる。主鏡と副鏡がそれぞれの支柱 (トラス) で支えられ、望遠鏡が重力変形した際に、これら支柱のたわみ量が同じになるように設計することで、変形後もアライメントが保たれる。この構造を実現するために、それぞれの支柱を支える頑丈な箱構造が必要となる。Meinelは重くなるセルリエトラスを活用せず、たわみによる副鏡の変位を補正するアクチュエータを提案した。

^{*3} 分割鏡の場合1枚の厚さはすべて同じなので、口径をスケールアップしても厚さ方向にはスケールされないという利点がある。

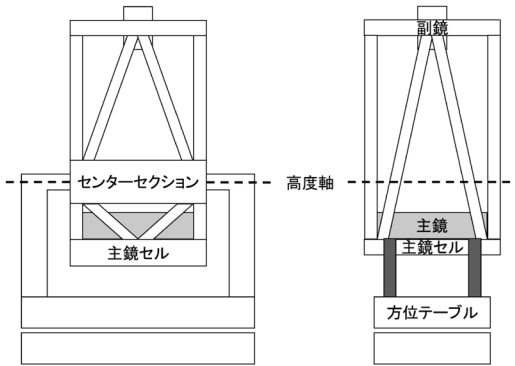


図2 せいめいの設計方針. 左が従来の経緯儀. 右がせいめいの経緯儀.

2.1 真下から支えるアークレール

せいめいでは上記の軽量化技術に加え、鏡筒を支える構造の設計を変えることでさらなる軽量化を目指した。開発は名古屋大学で2002年ころから開始された [7]。

物体の変形の形態のうち代表的なものとして曲げと引っ張り一圧縮がある。これらに加えてせん断があるが、多くの構造物ではせん断変形は小さく、ここでは言及しない。定規をイメージするとわかるように、定規は小さな力で大きく曲がるが、引っ張りに対してはほとんど変形しない。同じ構造でも変形の形態、すなわち外力のかかり方によって大きな差が生ずる。

せいめいの構造における設計方針を図2を用いて説明する。経緯儀は水平方向と垂直方向の2軸の回転運動によって天体を追尾する。垂直方向の回転運動を高度軸が担う。従来の構造の場合、高度軸が箱型の構造（センターセクション）を貫き、センターセクションの上下にモーメントのバランスをとるように副鏡と主鏡が配置される。主鏡と副鏡を支え、高度軸まわりに回転する構造が鏡筒であり、モーメントだけでなくたわみのバランスをとったものがセルリエトラスと呼ばれる。センターセクションを支えるために門型の構造とそれら全体を水平

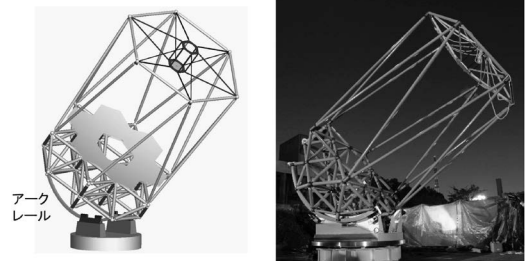


図3 左が2003年の春の年会で報告した際の軽量架台の3次元モデル。ジャングルジムのようなトラス構造を真下から支える円弧上のアークレールを備える。当時の設計では口径2 m規模の六角形の分割鏡を搭載することを想定していた。右は2005年に行われた名古屋大学での屋外試験の様子。背景は豊田講堂の時計台。

回転させる方位テーブルが用意される。

従来の望遠鏡構造は、変形の許されない重い主鏡を皿のような主鏡セルに乗せ、その主鏡セルを外縁部で吊り下げる。これにより、主鏡セルには曲げ変形が生じる。また鏡筒を支えるセンターセクションも両端で支えられるため曲がる。曲がる部位は十分な固さを獲得するために必然的に厚みが増し重くなる*4。そこで、我々は曲げ変形を極力とり除いた新しい構造を検討した。

新しく考案した構造は主鏡セルを真下から支える方式（図2の濃いハッチ部分と図3の「アークレール」）とした。一見不安定に見えるが、重力方向に対しては曲げ変形が小さくなる。曲がる部位が減ったことで、構造が軽量かつ固くなった。また大きなセンターセクションがなくなり、方位構造も小型になったことがわかる。

2.2 トラス構造

その後、実際に概念設計に取り掛かり（図3左図参照）、2005年には口径2 mクラスの実験機を製作し、屋外における駆動試験などを行った（同右図）。この実験機では主鏡を支える部分にトラス構造を用いてさらなる軽量化を狙った。トラス構造とは三

*4 曲げ変形を軽減するために厚みを増すと変形の形態は変形の小さいせん断に近づく。

角形を基調とした線材（鉄パイプ）からなり、構造の中に曲げ変形を伴わず、引っ張りと同圧縮変形のみが生じる効率的な構造である。このようにして新しい望遠鏡構造は一般に使われる炭素鋼を用いて従来の1/4程度の軽量化を実現した。

なおトラス構造は太陽工業(株)製の一般建築用のものを採用した。建築用のトラス部材は米国のHobby-Eberly望遠鏡 [8] からヒントを得た。Hobby-EberlyはドイツのMero社のシステムトラスを採用しており、偶然同じシステムトラスを太陽工業がライセンス生産していた。これにより複雑なトラス構造も低コストで調達することができた。また同社にはシステムトラス専用の構造計算の環境も整備されていたため、設計や解析を非常に短時間に行うことができた。

3. 遺伝的アルゴリズムによる最適化

分割鏡は従来の1枚鏡に比べてやっかいな問題を投げかけた。それは鏡の位置と姿勢を決定する固定点の変位を抑えることである。これら固定点は各鏡に対して3つ用意される^{*5}。固定点は図2の主鏡セルに配置される。単一鏡の場合、主鏡セルが歪んで鏡が傾いても望遠鏡の向きを変えることで修正できる。一方、せいめいの場合は18枚の分割鏡を用いるため、固定点は54点となる^{*6}。分割鏡は重力や温度変化によって主鏡セルが変形すると個々の鏡がバラバラに傾く。このずれを修正するために、各鏡の固定点にはアクチュエータが取り付けられ、鏡を押し引きすることで傾きを調整する。このアクチュエータには動作範囲の制限がある。鏡をナノレベルで位置調整するため、

30:1のてこ比でモータの動きを微小な動きに変換して用いている。その結果動作範囲は1mmしかない。動作範囲の1mmすべてを使って架台の変形を補正すると、設置誤差などによる調整が不可能となるため、架台に許容される変形を±0.1mmとした。しかしながら、当初我々が設計した架台の重力変形は許容値を超えていた。

3.1 ホモロガス変形

上述のように1枚鏡であれば固定点は3点なので主鏡セル全体の変形を考慮する必要はない^{*7}。一方、せいめいは54点を考慮する必要がある。54点の変位量を小さく抑え込もうとすると構造には高い剛性が要求される。そこで野辺山45m電波望遠鏡でも採用されたホモロガス性 [9] を採用した（図4参照）。45m鏡では主鏡の形状が望遠鏡の姿勢によって変形する。たとえば望遠鏡を傾倒したときに、主鏡の上部は凹面を閉じるように、下部は凹面が開くように変形するだろう。しかし、全体として元の形状に十分近い形状を保っていれば、主鏡は意図した仰角よりわずかに鉛直方向に回転しただけとみなすことができる。これは指向方向を補正することで修正可能である。このようにして剛体移動成分を許容することで主鏡セルに要求される剛性は緩和する。これと同じ概念をせいめいにも応用した。主鏡固定用の54点の変位のうちホモロガス性から外れた成分を新たに変位として再定義した。したがって、54点が相対位置を保ちつつ回転や平行移動のような剛体移動を示した場合、変位はゼロとみなされる。

3.2 せいめい特有の問題

図4が示すように、45m鏡の鏡面は高度軸付

^{*5} 従来の1枚のかたまりとなった鏡の場合でも鏡の大きさによらず、3点で固定する。大きな鏡になると変形を抑えるためにより多くの支点を用いるが、それら支点は天秤（Whiffle Tree）を介して3点の固定点に集約される。261本のアクチュエータを有するすばる望遠鏡の能動光学の場合でも、鏡は3点で固定され、アクチュエータは支持の補助の役割を果たす。

^{*6} 正確には、制御性を高めるために、基準となるインバー製のリングをカセグレン穴に配置しているため、57の固定点が必要となる。

^{*7} この点において、理論上は主鏡セルに高い剛性は要求されないはずであるが、多くの望遠鏡において主鏡セルは堅牢で重厚に設計されている。

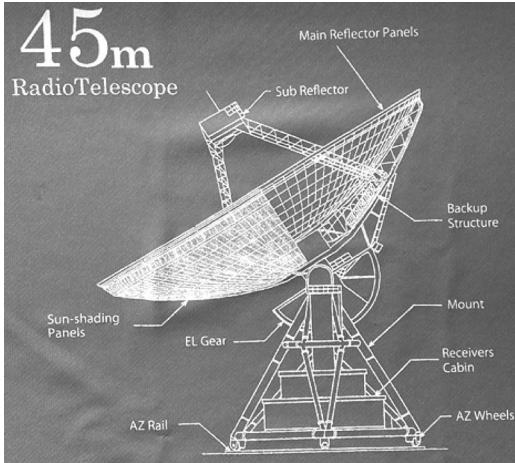


図4 野辺山45 m電波望遠鏡. 主鏡と支持構造は主鏡形状の相対的な変形を抑えたホモログス性を採用した. 主鏡を支える高度軸の支持部は主鏡に対して十分小さく, 望遠鏡の仰角によらず境界条件が一定に保たれているとみなせる.

近の小さい領域で支持されている. これにより仰角を変えても支持条件(有限要素解析における境界条件)をほぼ一定とみなすことができ, 変形を解析することは容易である. 一方, せいめいの場合, 図3の左に示すように, 望遠鏡の姿勢が変化するにつれてアークレールを保持する位置が変化する. これにより, せいめいの54点の変位の評価はホモログス性を考慮しつつ, 望遠鏡の仰角10度おきに評価する必要があった. 実際には, これら主鏡の支持点に加え, 剛体移動後の主鏡に対する副鏡と第三鏡の移動においてもホモログス性を考慮することとした. もちろん, 実機の副鏡には補正機構が導入されたが, この点においてはセルリエトラスの思想も取り入れることとした.

3.3 遺伝的アルゴリズム

上述の厳しい条件と解析の煩雑さを解決したのが, 名古屋大学の大森博司先生らが開発した遺伝的アルゴリズムを用いたトラス構造の最適化ソフトであった [10]. 遺伝的アルゴリズムとは相反する2つ以上の目的(本研究では軽さと固さ)を達成するための最適解を探索するアルゴリズムで

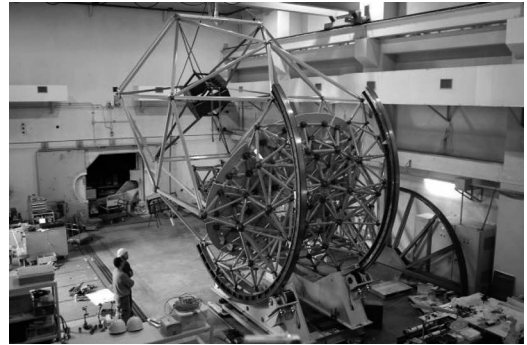


図5 名古屋大学の実験棟で仮組中のせいめい. パイプの集合体がトラス構造であり, 上部の副鏡を支える黒い部位, および対になった半円弧状の高度軸軸受け(アークレール)が遺伝的アルゴリズムによる最適化の対象部. パイプを線材, 連結部を節点(グローブ)と呼ぶ.

ある. 異なる物理量である軽さと固さをスカラー量とし, 重みをつけて足し合わせる. これを目的関数と呼び, その目的関数を最小化するように探索を行う. 遺伝的アルゴリズムはトラス構造の様に設計変数が膨大にあるときに威力を発揮する.

具体的には以下のような手順で望遠鏡のデザインが「進化」していった. まず, 設計者が初期設計を行う. これがいわば初代となる. この設計データにおいてトラス構造の各部位が遺伝子の様に0と1の数値列で表現される. 各部位とは, 図5に示す部位であり, 主に節点の位置, 節点間をつなぐ線材の断面積(断面積ゼロつまり線材が無いことも含む)を指す.

遺伝情報に置き換えられた初代を用いてそれと似た第2世代の設計を複数作る. これは上述の遺伝子を改変することで計算機の中でランダムに行われる. この改変の操作は無作為に遺伝子を組み替える突然変異によって行われる. 複数の第2世代のうち目的関数の優れた設計のみを選択する. 人間ではあってはならないが計算機の中では容赦なくスコアの低い設計は淘汰されてしまう. 残った第2世代同志の遺伝子を適当に切り貼りし第3世代を複数つくる(交叉). この際に突然変異も

同時に行われる。以降、1世代あたり100の設計が生まれ、20の遺伝子が次世代に受け継がれるという作業を3,300世代繰り返した。このように突然変異、選択、交叉という生物の進化と同様のプロセスを経て、より優れた設計が計算機の中で生成される。また、まるで生物には固有の食物と生息領域があるように、最適化の際には選択できる材料は日本工業規格から選択され、光路を妨げるような領域には部材が侵入しないような制限を加える。

重要な評価関数は上述で説明した主鏡、副鏡、第三鏡の支持点のホモロガス変形量と総重量である。ホモロガス変形量は望遠鏡の仰角を天頂から20度までを10度ずつ評価した。この進化の過程で変則的な点が2つある。1点目は変形量についてである。ホモロガス変形が「より小さく」では仕様を満たさない可能性があり、望遠鏡として成立しない。そこで仕様値を満たすように、重みづけされ、また満たすまで世代を繰り返した。その結果、変形量が仕様値を満たした後はより軽い構造に進化するようになる。2点目は遺伝子の残し方である。上記の条件で進化させた結果、劇的に軽くなりとても華奢で固有振動数が低い構造となった。固有振動数が低いと望遠鏡の制御性が悪化する。本来は固有振動数も評価関数に含めるべきだが、開発時間の制限により、急遽固有振動数の高い初代の遺伝子が常に20の選択された遺伝子のうちの1つ加えられた。もはや亡霊あるいは究極の隔世遺伝である。のちに固有振動数も評価できるソフトを開発したが、当時はこの変則的な改良により所望の設計を得ることができた[11] (図6参照)。

なお、遺伝的アルゴリズムを用いて気づいたことが1つあった。それは「トンビがタカを生むことはない」である。変則的な隔世遺伝の成功もその一例であろう。また別の試みとして、雑に設計した初期モデルを進化させたところ、何世代進化させても目標のホモロガス変形を満たすことがで

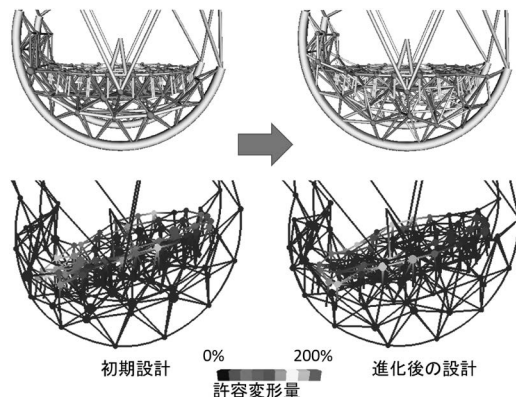


図6 主鏡セル付近の進化(最適化)の様子。左が進化前の初期設計(著者の設計)。右が採用された進化後の設計。上図はトラスの様子で、下図はホモロガス変形からの逸脱量を示す。進化前のトラスのコンフィグレーションは著者の設計により比較的規則的なパターンを示すが、進化後のそれには不規則に有機的なパターンを示す。また進化前は許容値を超えていた変形量が進化後には許容値を満たす。

きなかった。これは多くの最適化アルゴリズムに当てはまることであるが、アルゴリズムが優れていても設計者の経験や勘は重要な役割を果たす。太陽工業の技術者にはじめて遺伝的アルゴリズムを紹介したとき、少しだけ緊張が走ったことを覚えている。データと経験を積み上げてきた技術に対して計算機の中で勝手に進化する技術を提案することは推して知るべしである。

4. おわりに

以上のように、従来の軽量化技術に加え、セルリエトラスの概念をいったん捨てつつもホモロガス変形として再び採用し、さらに経緯儀と鏡筒の基本構造を見直すことで大幅な軽量化を実現することができた。なお、改めてMeinelの考案した図1とせいめいの設計方針である図2を見比べてみると、鏡を真裏から支えることで構造から曲げモーメントとセンターセクションを除去した点は共通であった。むしろMeinelの設計の方がさらに進化の先にあり、しかし、せいめいの設計にど

れほど突然変異を加えても到達しない設計であるように思える。セルリエトラスしかり、遺伝的アルゴリズムに対する経験と実績しかり、温故知新を改めて感じることができた。

謝 辞

せいめいに私に関わることができたのは2003年ころに開発を始めた軽量架台が2年後の実証実験で満足のいく結果を示してくれたからである。この開発の原資は2003年6月からいただいた国立天文台の共同開発研究費であった。1,000万円の予算申請に対し審査員からの回答は「D1の学生がこのような大金を申請するのはいかがなものか」との苦言が添えられた259万円であった。これで3次元CADを購入し、さらに国立天文台からは大学支援経費として軽量架台の開発費をいただいた。

この望遠鏡の一番の特徴は図3に示したトラス構造を真下から支えるアークレールである。実は当初の私の案は主鏡セルを軽くするためだけにトラス構造を採用したものだ。つまり、従来構造と同様にセル両端を高度軸で支える構造であった。トラス構造の入手のために太陽工業の野田範昭氏に相談した。この概念設計を説明した際に野田氏から「このような平べったい構造物を両端の2点だけで支えるのですか。弱そうですね。建築では真下から支えますよ。」と言われた。まったく考えたこともなかったことであった。かくしてこの貴重なアドバイスにより現在のせいめいの基本が出来上がった。つまりこの望遠鏡は野田氏のアイデアである。

設計と材料が決まり、夏に名古屋大学の実験棟のシャッターを開けて組み立て作業を行っていた際に、その後遺伝的アルゴリズムによる最適化を行ってくれた大森先生が通りかかった。大森先生は「君、何をやっているの。へー。望遠鏡か。このトラス構造は僕の研究テーマだよ。最適化してみないか。」とその場で話が進んだ。このアイデアを差し出してくれたのも先生の方からであった。

望遠鏡が組み上がり、いよいよ屋外試験をすることとなった。資金不足のため、ブルーシートと足場で簡易の制御室を作り、望遠鏡は駐車場に野ざらしだった。秋晴れを狙った2週間ほどの実験であったが、友人の結婚式に参加していた2005年11月6日(日曜の友引)の夕方から大雨が降った。指導教員であった佐藤修二先生から「栗田君、雨が降ってきたよ。」との携帯電話への連絡があり、タクシーで大学に戻ると、佐藤先生が麗しい娘さんとずぶ濡れになりながら望遠鏡にブルーシートを掛けようとしていた。

参考文献

- [1] 佐々木敏由紀, 家正則, 1998, 計測と制御, 37, 822
- [2] Meinel, A. B., 1982, J. Opt. Soc. Am., 72, 14
- [3] Angel, J. R. P., & Goble, L., 1984, J. Opt. Soc. Am., 1, 1250
- [4] Hardy, J. W., 1978, Proceedings of the IEEE, 66, 651
- [5] Cohen, R. W., et al., 1994, Proc. SPIE, 2199, 105
- [6] 伊藤昇, 2011, 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, 5, 232
- [7] Kurita, M., et al., 2009, PASP, 121, 266
- [8] <https://mcdonaldobservatory.org/research/telescopes/HET> (2021.03.05)
- [9] 森本雅樹 ほか, 1982, 三菱電機技報, 56, 499
- [10] 河村拓昌, 大森博司, 2000, 日本建築学会構造系論文集, 65, 115
- [11] Kurita, M., et al., 2010, 7733, 1209

Light Weight Telescope

Mikio KURITA

*Graduate School of Science, Kyoto University,
Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto
606-8502, Japan*

Abstract: One of the technical goals of Seimei project is reducing the mass of telescope structure. Minimization of the structure and saving of the weight lead to cost reduction of the telescope construction and also realize rapid motion of the telescope. The latter helps study of transient phenomenon such as novae and flare on stars. For this purpose, we developed a new lightweight design and optimized the design with genetic algorithm with merit functions of lightness and stiffness. By virtue of its light-weight, the telescope is able to point an object anywhere in the observable sky within one minute.