

# ナトリウム温度ライダー受信機の開発

川端哲也

部局系技術支援室 研究所・センター技術系 太陽地球環境研究所

## 1 はじめに

ナトリウム温度ライダーは、高度 80km~120km に分布する地球大気のナトリウム原子層を利用して、この領域の大気温度を測定する装置である。この装置はノルウェーのトロムソ（北緯 69.6 度）にある欧州非干渉散乱ライダー（EISCAT レーダー）サイトに設置され、他の大気ライダーや光学観測機器とあわせて高緯度地域における超高層大気の研究に用いられる。

ライダーは、リモートセンシング技術の一つで、遠隔からレーザーを照射し、その散乱光を時系列に受信して、物体までの距離とその物理状態を調べる装置である。ナトリウム温度ライダーでは、波長 589nm（ナトリウム D<sub>2</sub> 線）のパルスレーザーを上空に照射しナトリウム原子の共鳴散乱光を地上の望遠鏡で受信する（図 1）。狭帯域化されたレーザーの波長を制御することで、ナトリウム原子の熱運動による D<sub>2</sub> 線のドップラー広がりを利用して温度を測定の。また、レーザーが発射されるタイミングと散乱光が戻ってくる遅延時間から温度の高度分布が得られる。さらに、このライダーはレーザーを 5 つに分岐し、鉛直方向に加えて天頂角が 30 度で方位角が 90 度ずつ異なる 4 方向にも同時にレーザーを照射し、独立した 5 台の望遠鏡でそれぞれの方向からの散乱光を受信することで、空間的な温度勾配も測定できる装置となっている。

筆者は、太陽地球環境研究所の第 2 部門からの依頼を受け、ナトリウム温度ライダー受信機の開発を行っている。ライダー受信機を製作するにあたり、信州大学と国立極地研究所によって共同開発され、2000 年~2003 年に昭和基地で運用された南極ナトリウム温度ライダーを参考とした[1-2]。受信機は、全部で 5 台製作するが、はじめに試作として 1 台のみ製作し、テスト観測を行ってから修正を加えて残り 4 台を製作することになった。ここでは、ライダー受信機の概要とテスト観測の結果、および設計と製作の実際について報告する。

## 2 基本設計

ライダー受信機のシステム構成は、上空からの散乱光を集光する光学望遠鏡、光の波長選択をおこなう光学系、光を検出する光電子増倍管 (PMT) と PMT から出力されるパルス信号を積算するカウンターからなる。光量の測定方法としてはフォトンカウンティング法を用いている。ここでは、基本設計の際にポイントになった「アフターパルス」と「カウンターの選定」、「PMT の選定」について述べる。

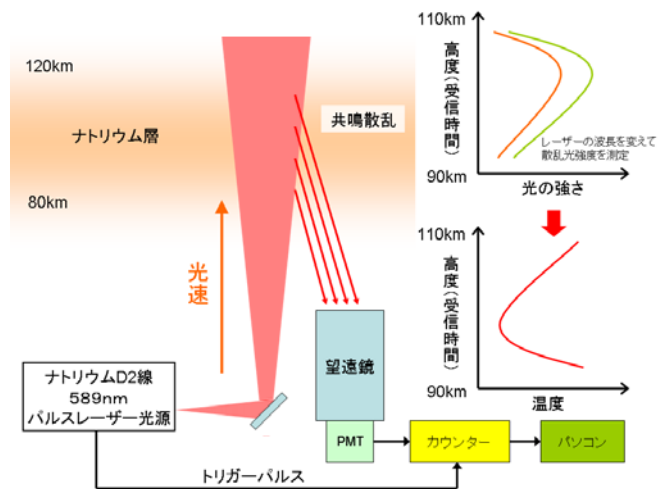


図 1 ナトリウム温度ライダーの概略図

## 2.1 アフターパルス

ライダー観測では、しばしばアフターパルスが問題となる。アフターパルスとは、強い光が PMT の光電面に入射した際に、数 nsec~数  $\mu$  sec にかけて擬似的にパルスが発生する現象で、PMT の第一ダイノードでの弾性散乱電子や光電管内の残留ガスが電子と衝突してイオン化されることにより起こる現象である[3]。ライダー観測では、特に低高度からの強いレーザ散乱光が戻ってきた際に起こるため、これを避けるために 1) ゲート付きの PMT を用いて、低高度からの信号を減衰させる。2) 回転チョッパーで低高度からの散乱光を遮断する。3) レーザと受信望遠鏡を離し、視野を絞って低高度からの散乱光が視野内に入らないようにする。といった方法を用いることが多い。今回は、3) の方法を選択することにした。具体的には、レーザと受信望遠鏡をそれぞれ納める 2 台のコンテナを用意し、レーザと望遠鏡が 8m 以上離れるように設置し、さらに望遠鏡の視野を直径 1mrad (3.4 分角) 以下に絞ることで高度 15km 以下からの散乱光を入射させないようにする。

## 2.2 カウンターの選定

ライダー用のカウンターは、レーザ 1 発ごとの散乱光に対して、あらかじめ設定された連続する微小時間ビン毎に検出されるカウント数を記録し、レーザ 1 発分のデータ収集が終わったら、それを積算レジスタに移して、最終的に数百発~数千発分の積算データとして出力する。ナトリウム温度ライダーでは、鉛直方向に 150km まで計測をおこなうが、この距離の光の往復時間は 1msec となる。一方、レーザ光源のパルス間隔も 1msec であり、カウンターはレーザ 1 発分のデータ収集を終えたら、すぐに次の計測が始まるため、ほぼリアルタイムに積算処理を行う必要がある。そこで XILINX 社の FPGA を用いてこれを実現している Sigma Space 社[4]のライダー用カウンター AMCS-USB を選定した。

## 2.3 PMT の選定

PMT は、観測波長 589nm 付近で量子効率が 40% と高く、外気温-35 度まで冷却でき、デスクリミネーターを内蔵した浜松ホトニクス社のフォトンカウンティングヘッド H7421-40 を選定した。デスクリミネーターとは、光電管から出力される電気パルスの波高によってノイズと信号に分けるコンパレータで、微弱な光を S/N 良く検出するためにフォトンカウンティング法で用いられる回路である。PMT の性能としては、他にダイナミックレンジがあるが、フォトンカウンティング法の場合、ダイナミックレンジは、短時間に連続して入射する 2 つの光子をどこまで個別に検出できるかという、光電管と電子回路の電気的特性となる。H7421-40 は、デスクリミネーター内蔵で使い勝手がよいが、それと引き替えにダイナミックレンジが同型で電流出力型の PMT より若干狭いという欠点がある。PMT の選定は、実際のナトリウム層からの散乱光強度が最大となる時の計数率 (1 秒間に換算したカウント数) から判断する必要があるが、これについては、まず H7421-40 を選定し、テスト観測で性能が十分であるかを判断することにした。

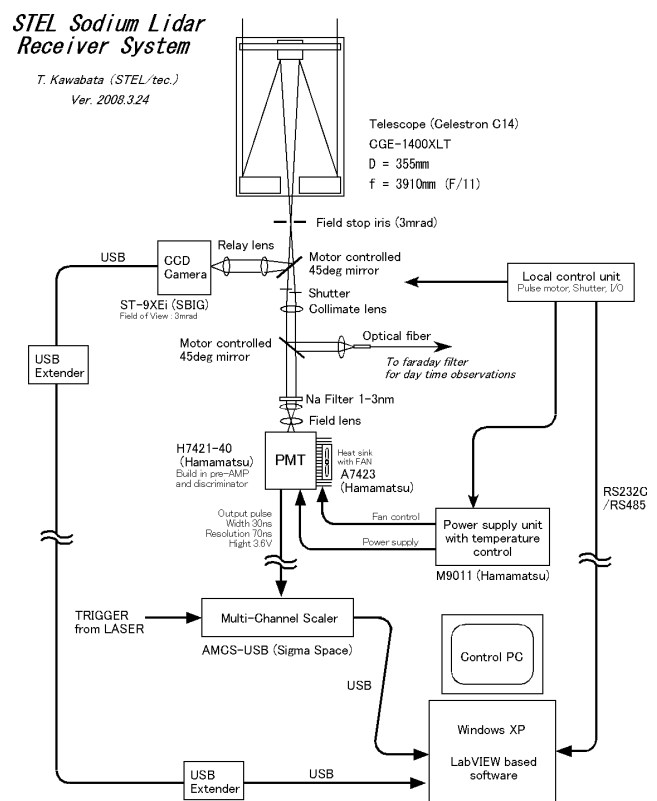


図2 ライダー受信機 1 号機のシステム図

### 3 光学設計

受信望遠鏡は、実際の散乱光強度と PMT のダイナミックレンジとのかねあいから口径が制限される。これは、テスト観測で実験的に評価しなければならないが、1号機としては比較的安価に入手可能な口径 35cm のシュミットカセグレン望遠鏡 (Celestron C14) を選定した。

ナトリウム層で散乱された光は望遠鏡で集光され、焦点面上にある絞りで必要な視野内からの光のみ光学系に入射する。絞りを通過した光は、コリメーターレンズ (f150mm) で平行光に変換され、干渉フィルター (Andover Corporation, 中心波長 589.53nm, 半値幅 3nm) を通過した後に再結像され、さらに結像面に置かれた視野レンズ (f25mm) で PMT の光電面に瞳像を結像する。こうすることで光電面の場所による感度ムラの影響を受けない光学系となる。コリメーターの焦点距離は、干渉フィルターの半値幅が 1nm で、直径 3mrad の視野の端でも波長のずれが 0.1nm 程度になるように選定した。他に望遠鏡の焦点像を撮像できる CCD 焦点を設け、45 度鏡で焦点を切り換えて使用できるようにしている。これは、望遠鏡の光学調整と設置時に望遠鏡が向いている方向を確認するための機能である。また、平行光中にも 45 度鏡を挿入することで光ファイバーに導く光学系も加えている。これらの光学設計は、レンズカタログを参考にしながら蹴られない光学系を表計算ソフトでおおよそ設計し、光学設計ソフト Optalix でその幾何光学的性能を確認した。

#### ナトリウムライダー 受信望遠鏡 焦点部光学系

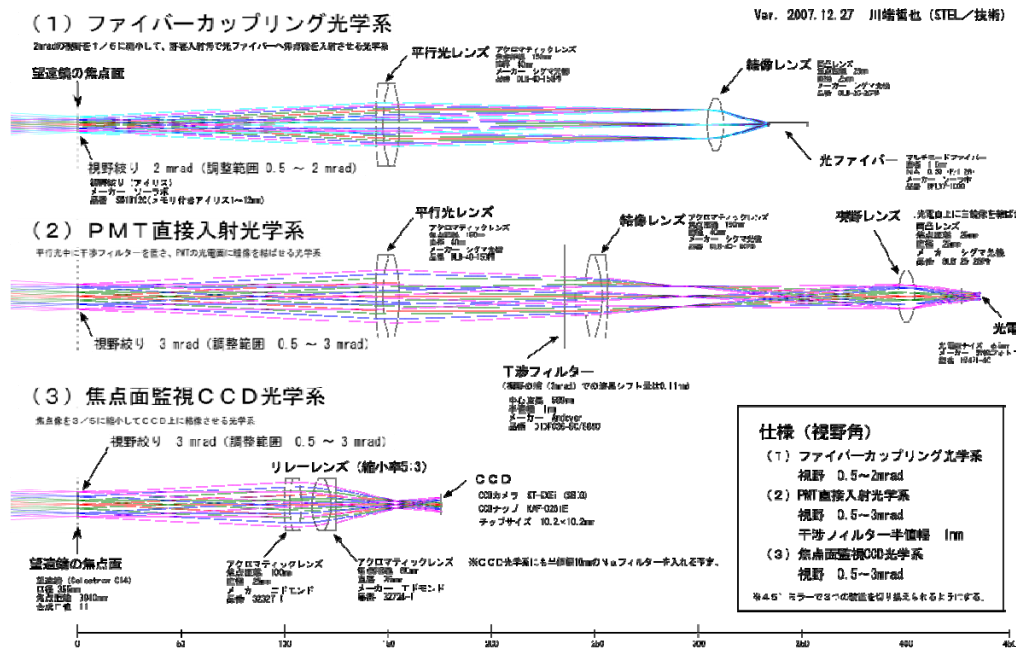


図3 焦点部の光学設計図

### 4 機械設計

光学設計が完了し光学素子の配置が決まったら、次に機械設計に移る。CADで概略図を描きメカニカル標準部品カタログを見ながら寸法や機構を詰めてゆく。製図には AutoCAD 2008 を用いた。設計で苦労した点は 45 度鏡を光路に挿入する機構で、はじめはフリップミラーのような回転系を用いて行路に鏡を挿入する方法を考えたが、精度を保証しながらモーター駆動を行う設計が意外に複雑になりそうだったので、最終的に 45 度鏡をリニアガイド上のテーブルに乗せ、横からスライドさせて挿入する方法をとった。駆動機構としては、ボールネジや台形ネジが考えられたが、コンパクトで安価なミニチュア滑りネジ[5]を採用した。ただし、位置決めがガタがあることが予想されたので、停止位置付近でスプリングプランジャーにより予圧をかける

よう工夫した。他に苦労した点は、設計も終盤にさしかかった時点で、滑りネジの指定寸法が製作不可寸法であることが分かり調整が必要となったことである。光学系を外形で組んでいるため、光路長が変わらないように設計を変更するのに苦労した。結果的にコンパクトではあるが、空間に余裕が少ない設計になってしまった。

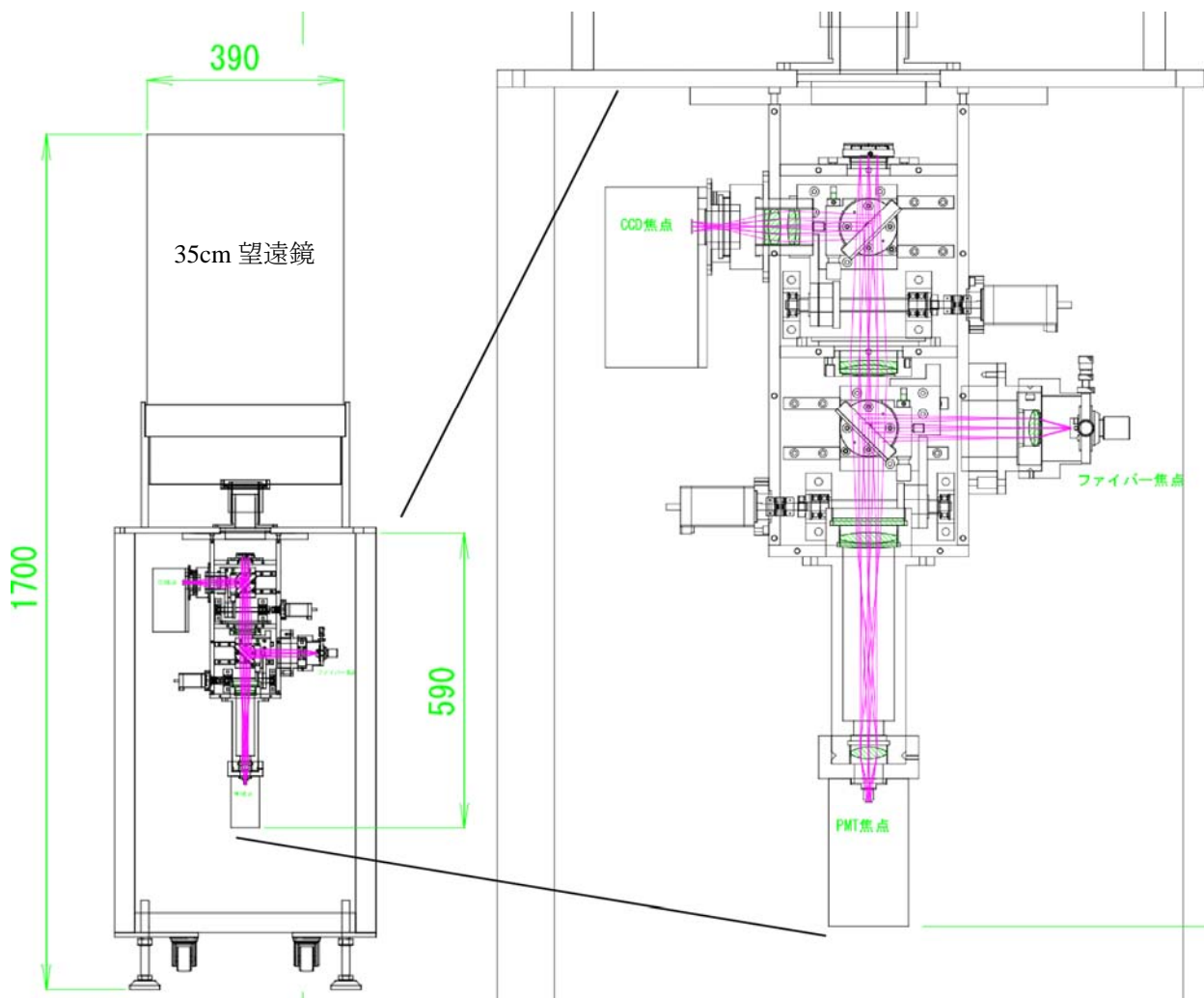


図4 ライダー受信機の機械図面

## 5 制御回路

ステッピングモーター2軸、シャッター（Uniblitz社製、型番CS35S1T0）およびPMT用電源のTTL入出力の制御を行うコントローラーを製作した。モーターコントローラーには、産業用の2軸モーター制御ボード（品川通信計装サービス社製、型番MC2X）を使用した。入力用フォトカップラーの電圧仕様が12VだったためTTL信号をトランジスタアレイ（ULN2003）でレベル変換して入力させた。その他、シャッターの駆動は、駆動時には電流が必要であるが、保持には大きな電流は必要ないので、それが実現できるようにコンデンサーとワット数の大きな抵抗を用いて回路を組んだが、発熱量が多く効率の悪い回路になってしまった。今後は、シャッター回路の改善に加えて光センサーのCdSにより周囲が明るいときには、PMTの高圧電源が入らないような安全回路を付ける予定である。

## 6 試験観測

昭和基地で運用されていた南極ナトリウム温度ライダーが、京都大学生存圏研究所に移設され運用されていることから、開発したライダー受信機を生存圏研究所に持ち込み、2008年7月に南極ナトリウム温度ライダーとの同時観測を行った。

図6が、開発した受信機で受信された散乱光強度の高度グラフである。レーザーショット数1500発分のデータを積算している。図中の赤線と青線はそれぞれレーザーの波長が589.1589nm（以後、fa）と589.1580nm（以後、fc）の散乱光である。このグラフは参考文献[3]に記載されている補正式  $N = M / (1 - M \cdot t)$  を用いてリニアリティーの補正を行っている。ここで、Nは真の計数率[1/s]、Mは計測された計数率[1/s]、tはパルスペア分解能[sec]で、H7421-40のパルスペア分解能は70nsecである。

図6で70km以下に見られる高度が下がるにつれて強度が増す成分は主に大気のリレー散乱光である。そして、高度85km~110kmからの信号がナトリウム層からの共鳴散乱光で、バックグラウンドを差し引いた後にfaとfcの2波長の散乱光強度を高度25km~35kmのリレー散乱光で規格化し、その比を取ることでナトリウム層の大気温度が計算される。図中1440カウントに引かれた緑の縦線は、計数率が $1.5 \times 10^6$ [1/s]になる線で、H7421-40のカatalog値では、このライン上でカウント値が10%損失している。

今回の観測は、南極ナトリウム温度ライダーとの同時観測であったため、結果を比較することができた。開発した受信機は、従来の受信機より高い効率で観測が行えることが確認できたが、温度計測では系統誤差が見られた。リニアリティーの補正が不十分な高度領域での規格化に問題があるのではないかと考えているが、今後さらにテスト観測とPMTの実験室におけるリニアリティー測定を行う予定である。また、より広いダイナミックレンジを持つPMTを新たに選定することも検討する。



図5 京都大学生存圏研究所でのテスト観測の風景。バルコニーに受信機を設置して観測を行った。レーザー光源は、建物の中にあり望遠鏡とは約13m離れている。

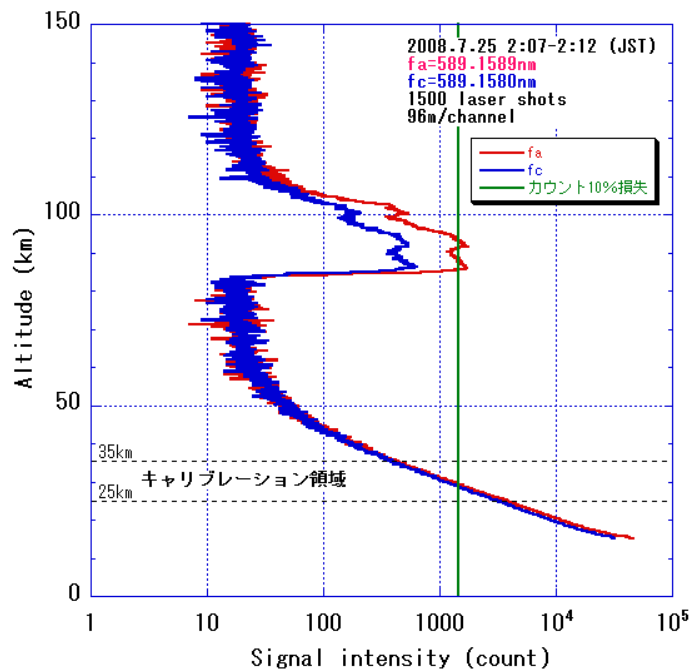


図6 テスト観測で得られた散乱光強度の高度プロファイル。高度分解能は96mで、レーザー1500発分の積算値となっている。

## 7 まとめ

ノルウェーのトロムソに設置されるナトリウム温度ライダー受信機の1号機を開発した。基本設計から光学設計、機械設計と製作、制御回路設計と製作、テスト観測まで一連の作業を行い、テスト観測の結果、受信機の動作としては良好であるが、PMTの選定については改善の余地があることが分かった。今後は、明らかになった問題点を丁寧に調べ、残り4台の製作を行い、科学的な観測に耐えうる装置として研究者に提供したいと考えている。

## 謝辞

着任してはじめての仕事で、まとまった開発を任せて下さいました太陽地球環境研究所の野澤悟徳准教授に感謝いたします。また、太陽地球環境研究所所長の藤井良一教授には、度重なる励ましの言葉と的確なご助言をいただきました。信州大学工学部の川原琢也准教授と鳥羽商船高等専門学校制御情報工学科の北原司助教には、ナトリウム温度ライダー受信機について丁寧に教えていただきました。テスト観測を快く受け入れて下さいました京都大学生存圏研究所の中村卓司准教授と江尻省研究員に感謝いたします。

この仕事は、多くの同僚技術職員の助言と協力によってすすめることができました。特に機械工作と JIS に基づく機械製図については、理学部第二装置開発室の小林和宏氏から丁寧な指導をいただきました。また、リニアガイドのメカニカル機構については、河合利秀氏から貴重な助言をいただきました。機械加工では、理学部第二装置開発室の工作機械を使わせていただき、部屋の皆様から加工の手ほどきをいただきました。電気回路で困っているところは、太陽地球環境研究所の同僚技術職員に助言をいただきました。

この場をおかりして、皆様にお礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] Kawahara, T. D., T. Kitahara, F. Kobayashi, Y. Saito, Tsutsumi, 2002: Wintertime mesopause temperatures observed by lidar measurements over Syowa Station (69S, 39E), Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002GL015244.
- [2] 北原 司 博士論文, 南極高層大気観測のためのナトリウム温度ライダーの開発, 信州大学, 2003
- [3] 浜松ホトニクス株式会社, 『光電子増倍管 その基礎の応用 第3版』, 1993
- [4] <http://www.sigmaspace.com/sigma/>
- [5] ミスミ FA 用メカニカル標準部品, p577, 2008