

5 波長分光フォトメーターの開発

川端哲也

計測制御技術支援室 計測機器技術グループ

概要

オーロラ観測用に5波長分光フォトメーターを開発したので報告する[1]。フォトメーターとは、光の強さを計測する装置で、オーロラの発光輝線にあわせた狭帯域フィルターと組み合わせて、特定の波長の光量を高速で記録する装置である。今回は、脈動オーロラ研究プロジェクト[2]の観測装置の一つとして整備された。開発に際して、(1) 5波長(427.8nm, 557.7nm, 630nm, 777.4nm, 844.6nm)を同時に観測できること、(2) 観測している正確な方向が分かること、(3) 変化の早い現象(100Hz)を捉えることができること、などの要件を満たすように設計した。この装置は2017年1月に北緯69.6度のオーロラ帯に位置するトロムソ(ノルウェー)に設置され、現在まで観測が継続されている。ここでは、製作した装置の概要を紹介するとともに特にアナログ回路について詳しく説明する。

1 5波長分光フォトメーターの基本構成

はじめに5波長分光フォトメーター(一式)の写真を図1に示す。フォトメーターは、光学系、信号増幅器、FAコントローラーの3つの機器から構成されており、図2で示すようにケーブルで接続される。FAコントローラーは、株式会社インタフェース[3]の計測制御用PC(タフコン Atom N2800)で、OSはInterface Linux 6(32bit)である。C言語で書かれた自動データ取得プログラムにより観測開始時刻になると自動的に観測がスタートする。また、LANに接続されておりネットワーク上からリモートでフォトメーターを制御できる。



図1. 5波長分光フォトメーター(一式)の写真

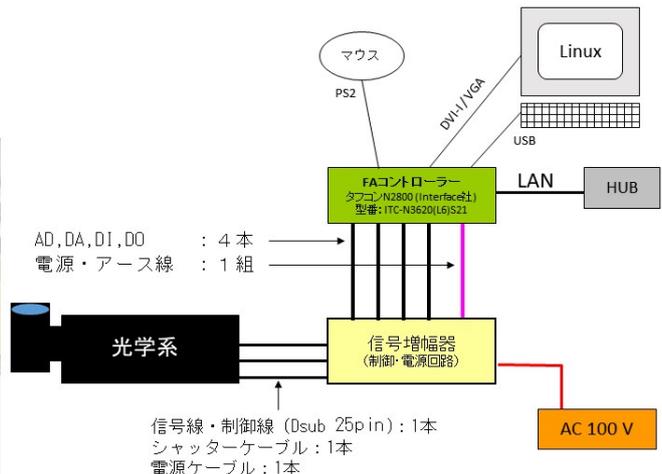


図2. フォトメーターの接続図

図3にそれぞれの機器の機能ブロック図を示す。光学系は、レンズ、ピンホールミラー、フィルターなどの光学部品と光電子増倍管(Photo-Multiplier Tube : PMT)から構成されている。信号増幅器は、PMTから出力される電圧信号を処理する他、電源やシャッター、PMTのゲイン調整回路、照度センサー(CDS)を使用

した安全回路等の制御装置が組み込まれている。FA コントローラーは、4つの汎用スロットを A/D 変換、D/A 変換、デジタル入力、デジタル出力としたモデル（型番：ITC-N3620(L6)S21）で、信号増幅器に接続される。FA コントローラーは、制御信号の入出力のほか、信号増幅器でアナログ処理された PMT から信号を A/D 変換して計測データを HDD に記録する。

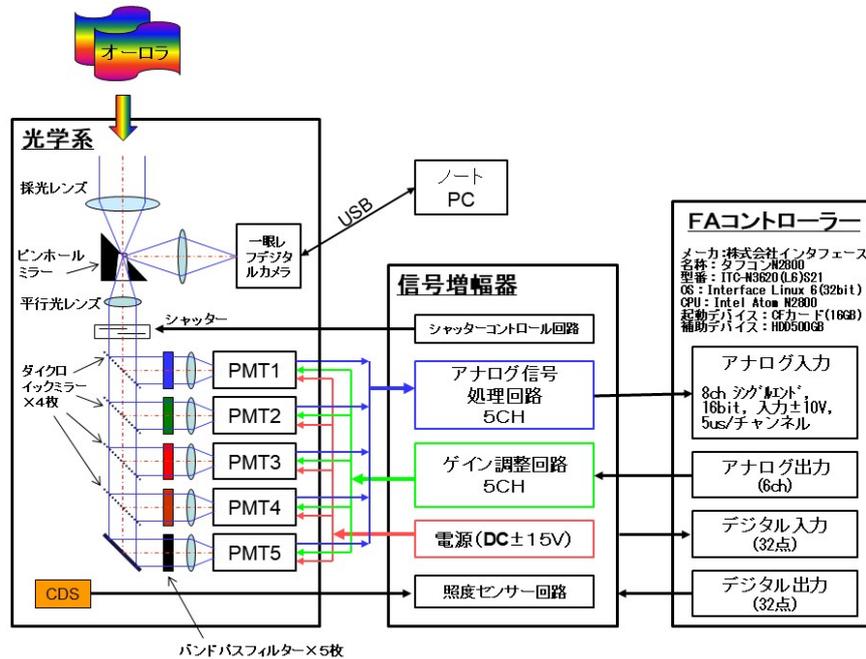


図 3. フォトメーターの機能ブロック図

2 光学系

図 4 に 5 波長分光フォトメーターの光学系の図面を示す。全体のサイズは、約 509×200×110mm である。後述する視野確認光学系にデジタルカメラを取り付けて、観測方向の画像を撮影することができる。第一レンズ（採光レンズ）のみ高度方向に角度が変えられるようになっている。その他、シャッター以外には可動部はない。

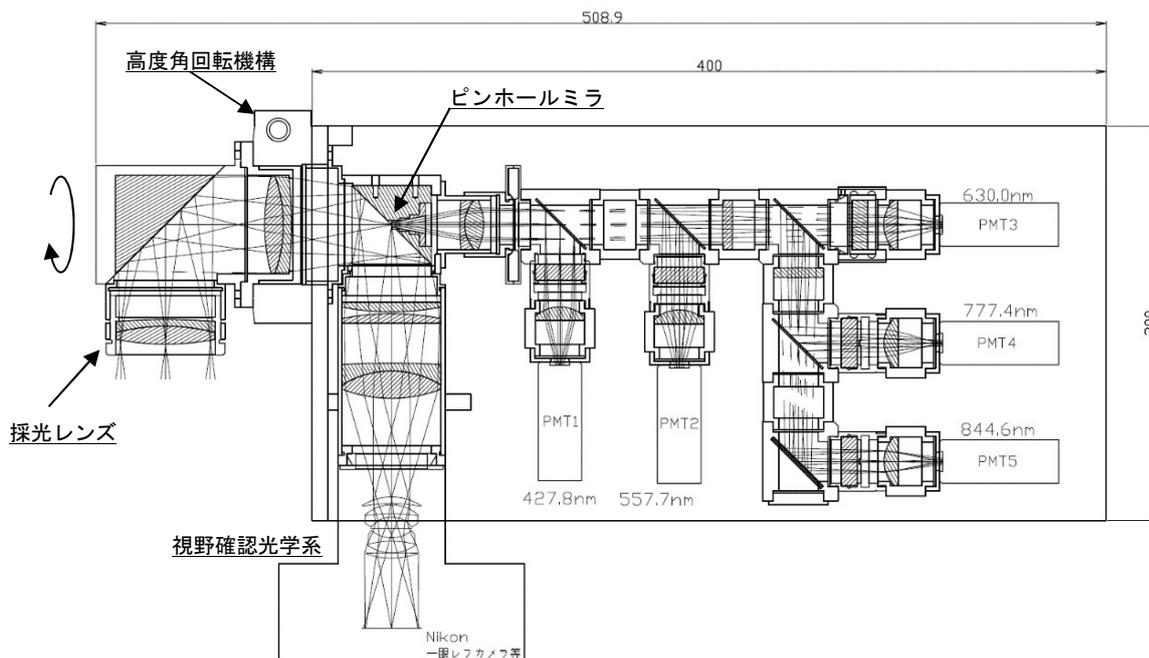


図 4. フォトメーター（光学系）の図面

2.1 視野確認光学

従来使用してきたフォトメーター[4]は、方位磁石と採光レンズの高度メモリをたよりに目的の方向に装置を向けていた。新たに開発したフォトメーターは、視野絞りとミラーを組み合わせた反射鏡（ピンホールミラー）（図5）を焦点面上に配置して、観測されている天域をデジタルカメラで撮影し、撮影された画像に写っている星の並びと、観測したい方向の星図を見比べてフォトメーターの方向を調整できるようになった。詳しくは、「名古屋大学 宇宙地球環境研究所 技術部報告 2019」[5]を参照されたい。

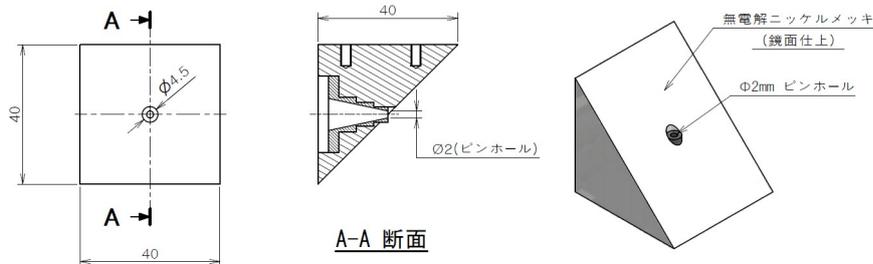


図5. ピンホールミラーの図面

2.2 ダイクロイックミラーによる光の分岐とバンドパスフィルター

ピンホールミラーを通過した光は、平行光に変換された後、ダイクロイックミラーで波長分岐され、オーロラ輝線に対応した狭帯域のバンドパスフィルターを通過して、PMTで計測される。

ダイクロイックミラーは、特定の波長より長い波長の光を透過させ、短い波長を反射するロングパスミラーと、短い波長を透過させ、長い波長を反射するショートパスミラーがあり、光軸に対して45度に設置することで光を分岐することができる。5波長を同時に計測するために図6のようにダイクロイックミラーを組み合わせている。ダイクロイックミラーは、Edmund Optics社[6]の製品を使用しており、図6中のミラーの側に記述された#は製品型番で、その他、透過波長域、反射波長域、括弧内に透過率と反射率を示している。

バンドパスフィルターは、光の干渉を利用した狭帯域フィルターで、特定の波長の光のみ透過させる。Andover社[7]の製品を使用しており、図6中にそれぞれの透過中心波長と括弧内に半値幅を示している。

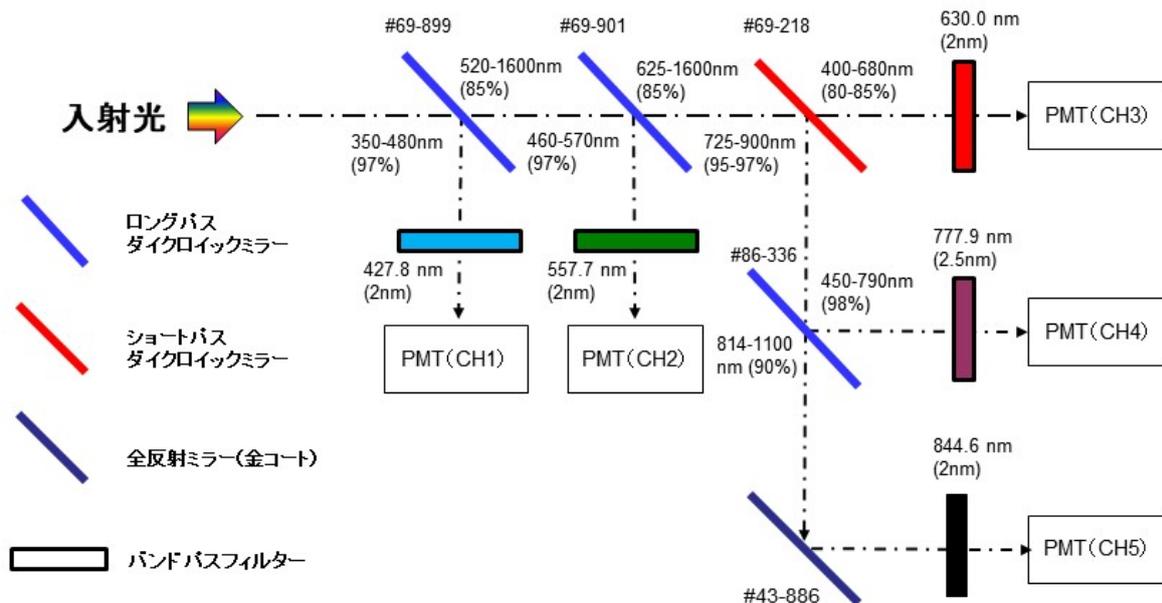


図6. ダイクロイックミラーとバンドパスフィルターの構成図

2.3 検出器

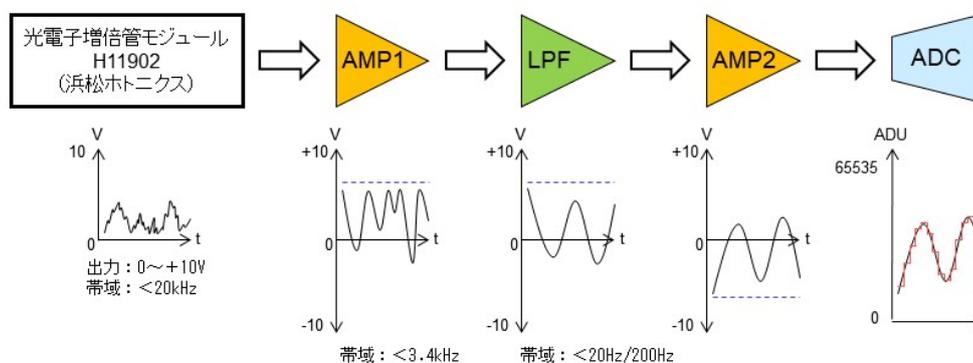
検出器は、高圧電源が内蔵され信号が電圧出力される浜松ホトニクス社[8]のPMTモジュールH11902シリーズを使用している。表1にPMTの主な仕様を示す。波長427.8nmを計測するPMTのみ短波長で感度が高いH11902-210を使用し、それ以外はH11902-20を使用している。このPMTモジュールは、外部からコントロール電圧(+0.5~+1.1V)を与えることで、PMTに印加する高圧電源の電圧を調整することができる。そこで、FAコントローラーのD/A出力を利用してPMTのゲイン調整を可能とした(図3)。

項目	H11902-210	H11902-20	単位
感度波長範囲(最高感度波長)	230-700(400)	230-920(500-700)	nm
有効光電面サイズ	Φ8		mm
電源電圧	±11.5~±15.5		V
ゲイン	2.0×10 ⁶ (コントロール電圧+1.0Vのとき)		-
出力信号の周波数帯域	DC~20kHz		-
最大出力信号電圧	+10(負荷抵抗10kΩ)		V
暗電流電圧出力(標準値)	1	10	mV

表1. 浜松ホトニクス H11902-210 および-20 の主な仕様

3 信号増幅器

本稿では「信号増幅器」と便宜的に呼んでいるが、図3に示すように機能としてはPMTから出力される電圧信号(0~+10V)を増幅・積分するアナログ信号処理回路、シャッターの制御回路、PMTゲイン調整回路、電源の制御回路、周囲が明るいときにPMTの電源を切るための安全装置である照度センサー(CDS)回路などが組み込まれた制御装置である。ここでは、特にアナログ信号処理について詳しく説明する。



記号	機能の説明
AMP1	機能: 積分反転増幅回路、減算回路 増幅率: 1倍、10倍、100倍、1000倍(アンプ回路基板交換式)
LPF	機能: ローパスフィルター、非反転 カットオフ周波数(fc): 20Hz/200Hz(マイクロリレー切替式)
AMP2	機能: 反転増幅 増幅率: 1倍~6倍(1倍に設定)
ADC	FAコントローラ、ITC-N3620(L8)S21、株式会社インタフェース 機能: A/D変換、16bit(-10V~+10V) サンプリングレート(最高): 5μs/チャンネル(チャンネル切替時)

図7. アナログ信号処理の流れ

図7にPMTの出力からA/D変換までの信号処理の流れを示す。5波長分光フォトメーターの要件として100Hzの現象を捉えることが求められているが、PMTからの出力帯域はDC~20kHzで、対象としている現象に比べて非常に高速である。また、PMTの出力電圧範囲は0~10Vとなっている。FAコントローラーの

A/D 変換器は-10V~+10V を 16bit に分割しているため、そのままではダイナミックレンジをいかすことができない。そのため、まず AMP1 で電圧値にオフセットをかけるとともに積分・増幅する。ここで、オーロラの発光輝線の強度が波長ごとに異なることから、5つの入力チャンネルごとに増幅率を変える必要があるため AMP1 は取り替え可能なモジュール基板として、1 倍、10 倍、100 倍、1000 倍の 4 種類の基板を用意し、それらを付け替えて倍率を変更できるようにした。この倍率は一度決まってしまうと変更しないので、取り替え式でもさしつかえない。図 8 に 100 倍の AMP1 モジュールの回路図を示す。図 8 中の OFFSET から適当な電圧を加えることにより出力電圧にオフセットをかけている。また、周波数帯域を 3.4kHz まで落としている。

次にローパスフィルター(LPF)をかけるが、カットオフ周波数(f_c)を 20Hz と 200Hz の 2 種類を用意し、FA コントローラーのデジタル出力で基板上に配置したマイクロリレーを制御して切り替えられるようにした。 $f_c=20\text{Hz}$ は、従来のフォトメーターで採用されていたフィルター特性で、 $f_c=200\text{Hz}$ は 100Hz の信号を減衰なく検出するために新たに用意した回路である。LPF はバターワース型 (非反転) のアクティブフィルターとなっている (図 9)。最後に 1 倍の反転増幅回路 AMP2 で電圧を反転させている。

図 10 に LPF を $f_c=20\text{Hz}$ および $f_c=200\text{Hz}$ とした時の信号増幅器 (AMP1,LPF,AMP2) の周波数特性を示す。周波数特性は基本的に LPF で決まっており、振幅が 3 デシベル減衰した周波数がカットオフ周波数となっている。 $f_c=20\text{Hz}$ では 10Hz まで、 $f_c=200\text{Hz}$ では 100Hz まで減衰がない信号が得られる。実際の観測では、 $f_c=200\text{Hz}$ を標準的な設定として、A/D 変換器のサンプリング周波数 400Hz でデータを取得している。

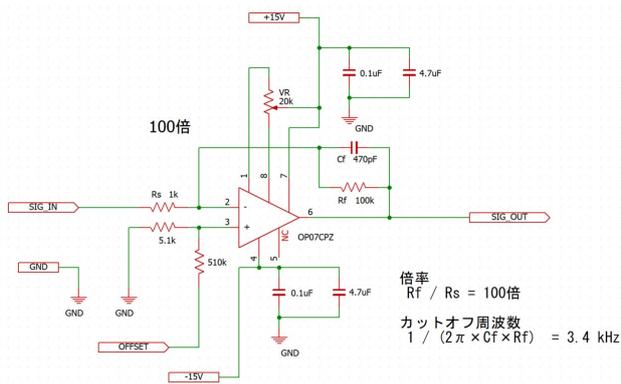


図 8. AMP1 の回路図 (倍率 100 倍)

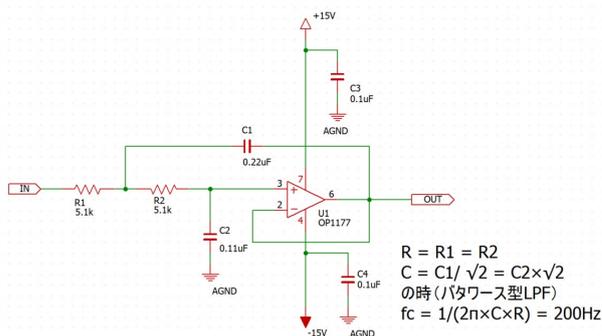


図 9. LPF の回路図 ($f_c=200\text{Hz}$)

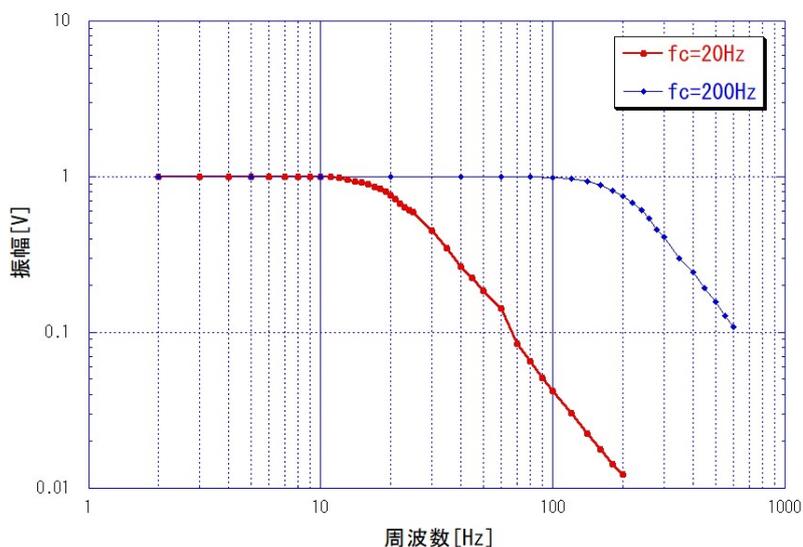


図 10. 信号増幅器の周波数特性 (AMP1 の倍率 100 倍)

4 まとめ

5波長分光フォトメーターは、2016年7月末から本格的に設計を始め、2017年1月はじめに国立極地研究所の標準光源による強度較正実験をへて、2017年1月末にノルウェーのトロムソに設置された。開発スタートからサイト投入まで約半年であったが、なんとか完成することができた。その後も細かな修正を行いつつ現在まで毎年冬期の観測が継続されている。最後に5波長分光フォトメーターの諸元を以下に記す。

■ 5波長分光フォトメーター

- ・ 採光レンズ : 口径 50mm (有効径 47mm)
- ・ 採光レンズ角度範囲 : 天頂角 0 度～90 度
- ・ 測定範囲 : 直径 0.98 度角
- ・ 視野確認範囲 (直径) : 約 13 度角 (一眼レフデジタルカメラ)
- ・ 測定波長 (半値幅) : 427.8nm(2nm), 557.7nm(2nm), 630nm(2nm), 777.9nm(2.5nm), 844.6nm(2nm)
- ・ 検出器 : PMT (H11902 シリーズ、浜松ホトニクス)
- ・ ローパスフィルター : 20Hz/200Hz 切り替え式
- ・ サンプリングレート : 400Hz (fc=200Hz の時)
- ・ シャッター : メカニカルシャッター (DDS25B1T0, UNBILITZ[9])
- ・ 電源電圧 : AC100V
- ・ OS : Interface Linux 6
- ・ ソフト : 自動観測ソフト (C 言語)

参考文献

- [1] Nozawa, S., T. Kawabata, K. Hosokawa, Y. Ogawa, T. T. Tsuda, A. Mizuno, R. Fujii, and C. M. Hall, A new five-wavelength photometer operated in Tromso (69.6oN, 19.2oE), Earth Planets Space, 70, 193, doi:10.1186/s40623-018-0962-x, 2018
- [2] 脈動オーロラ研究プロジェクト <http://www.psa-research.org/>
- [3] 株式会社インタフェース <http://www.interface.co.jp/>
- [4] Adachi, K., S. Nozawa, Y. Ogawa, A. Brekke, C. M. Hall and R. Fujii, Evaluation of a method to derive ionospheric conductivities using two auroral emissions (428 and 630 nm) measured with a photometer at Tromso (69.6°N), Earth Planets Space, 69, 90, doi:10.1186/s40623-017-0677-4, 2017
- [5] 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 技術部報告 (2019 年度) in preparation
- [6] Edmund Optics, <https://www.edmundoptics.jp/>
- [7] Andover Corporation, <http://www.andcorp.com/>
- [8] 浜松ホトニクス株式会社, <https://www.hamamatsu.com/>
- [9] UNBILITZ, <https://www.uniblitz.com/>