

円滑な連携観測のための 諸環境整備

渡辺 誠

〈北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
〒060-0810 札幌市北区北十条西8丁目〉
e-mail: mwata@ep.sci.hokudai.ac.jp



渡辺



秋田谷

秋田谷 洋

〈広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山1-3-1〉
e-mail: akitaya@hiroshima-u.ac.jp

光・赤外線天文学大学間連携事業では、国内外の多数の光学赤外線望遠鏡を連携させた観測ネットワークによる突発天体や時間変動天体の観測研究を遂行している。これら突発天体や時間変動天体の観測には、即応的な観測開始や連続的なデータ取得が求められ、観測提案者が、各地に散らばる観測地点それぞれの観測機器の運用状況と天候状況を把握し、適切な観測指示を送る必要がある。われわれは、この情報把握を行いやすくするために、スカイモニタの製作と配備、望遠鏡・観測装置の運用状況一覧やその他観測補助情報の提供 Web ページの整備を行った。

1. はじめに

光・赤外線天文学大学間連携事業では、日本国内外の多地点（観測所15カ所・光学赤外線望遠鏡16台；図1）を連携させた観測ネットワークすなわちOISTER^{*1}ネットワークによる突発天体・時間変動天体の観測を実施している。

これらの観測は、研究者が事前に提出した観測提案に基づいて行われ、その観測提案の研究代表者（もしくは共同研究者）が、観測開始のトリガーとなる天体現象の発生に応じて、各観測所に観測指示を送り、それに各観測所が対応することで実施される。日本は一般的にはそれほど天候は良くないが、本事業のように国内でもこれほど広がった観測ネットワーク網を構築すると、どこか

しらが晴れていることが多い。また、各観測所ではそれぞれ異なる機能をもつ観測装置をそれぞれの形態で運用しており、このような多地点かつ多様な望遠鏡・観測装置を連携させ、観測を迅速かつ円滑に遂行するためには、まず研究代表者が各観測所の天候状況と望遠鏡・観測装置の運用状況を十分かつ迅速に把握する必要がある。そのうえで、そのときの状況に応じた各観測所の役割分担（波長帯・観測モードなど）を決定し、的確な観測指示を各観測所に送る必要がある。

そこで、連携事業の観測企画運営委員会では、研究代表者が各観測所の最新の天候および機器の状況を把握しやすくするために、筆者らが「環境整備班」として、次のような観測環境の整備を行った。

^{*1} Optical and Infrared Synergetic Telescopes for Education and Research の頭文字を取ったもの。

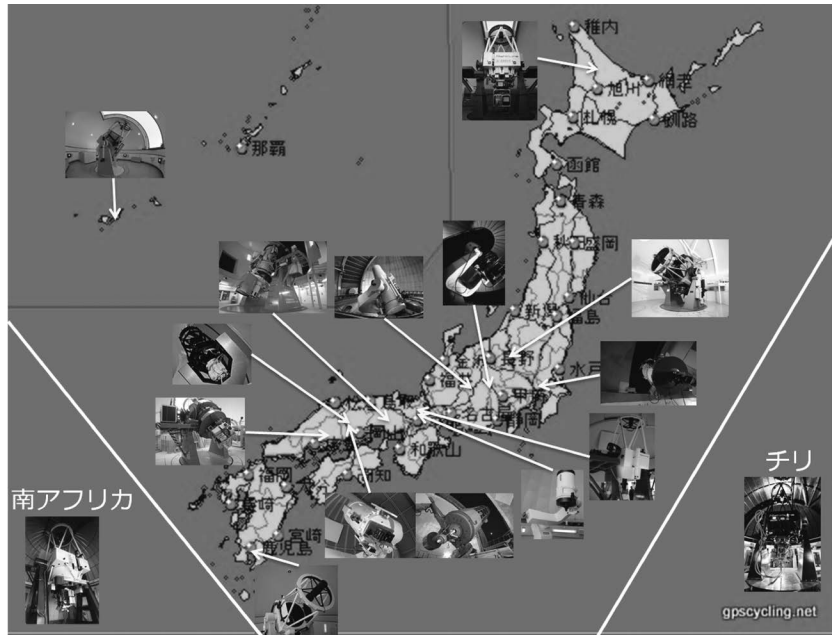


図1 光・赤外線天文学大学間連携事業に参加している望遠鏡群（地図データはGpsCycling.net提供）。

- ・スカイモニタの製作・配備
- ・望遠鏡・観測装置の運用状況一覧Webページの作成・運用
- ・観測補助情報の整備（観測所連絡先一覧，望遠鏡指向可能高度一覧など）

本稿ではスカイモニタの製作を中心に，観測環境の整備について紹介する。

2. スカイモニタの製作・配備

観測所の天候状況を把握するには，スカイモニタを利用して，雲の有無など空の状態を画像で確認するのが有効である．連携機関内においては，国立天文台岡山天体物理観測所や広島大学東広島天文台にて，すでに，可視光のスカイモニタシステムが製作・運用されており¹⁾⁻³⁾，北海道大学では，これらのシステムを参考に，北大大学院理学研究院附属天文台用スカイモニタの製作検討を先行して進めていた．そこで，観測企画運営委員会では，まず北大大学院理学研究院附属天文台にスカイモニタを配備し，その製作・運用実績を元

に，ほかの観測所への配備を進めることとした．

2.1 要求仕様

スカイモニタの設計・製作に当たっては，以下を要求項目として挙げた．

- 1) 暗夜における雲の有無の判別のため，新月期に5等星程度までの明るさの恒星を検出できること．
- 2) 昼夜問わず24時間モニタできること．
- 3) 十分な融雪能力をもつこと．
- 4) 結露を起こさないこと．
- 5) 安価な構成とすること．
- 6) できるだけメンテナンスフリーとすること．

これらの要求を満たすスカイモニタの構成を検討した結果，ハードウェアとしては，広島大学の新スカイモニタ³⁾とよく似た構成となった．主な仕様を表1に示す．また，図2に北大大学院理学研究院附属天文台に設置したスカイモニタの様子を示す．

2.2 カメラとレンズの選定

全天 2π ステラジアンという広い視野を，縦横

表1 スカイモニタの主な仕様.

カメラ	デジタル一眼レフカメラ Nikon D3100 (23.1×15.4 mm サイズ CMOS センサー, 記録画素数: 4608×3072 ピクセル)
レンズ	魚眼レンズ SIGMA 4.5 mm F2.8 EX DC Circular Fisheye HSM (焦点距離: 4.5 mm, 絞りサイズ: F2.8-F22)
視野	方位 306°, 高度 90°
ピクセルスケール	3.9×3.9 分角ピクセル ⁻¹ (天頂にて)
画像サイズ	2,672×2,672 ピクセル
シャッター速度	1/4,000-30 秒
ISO 感度	100-12,800 (通常 1,600 を上限に設定)
ハウジング	アクリルドーム付き気密容器
サイズ	幅 400×奥行 300×高さ 181 (ハウジングのみ) / 231 mm (ドーム込み)
内部保温	167 W のヒーターにてハウジング内部を約 25°C に温度制御
融雪	200 W のヒーターにてハウジング上面を約 5°C に温度制御
インターフェース	USB 2.0 (カメラ PC 間を 20 m の USB 延長ケーブルにて接続)
OS	Linux 2.6 (64 bit)
ソフトウェア	定期画像取得プログラム (C 言語) + 画像加工コマンドスクリプト

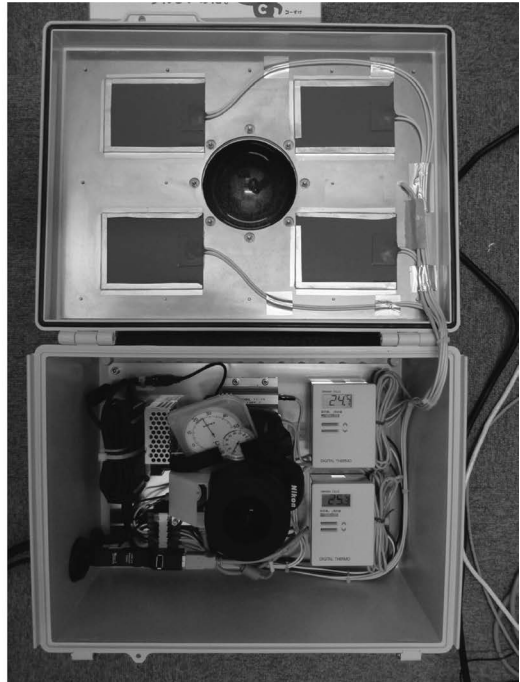


図2 北海道大学大学院理学研究院附属天文台の建物屋上に設置されたスカイモニタ (左) とハウジング内部 (右).

それぞれ数百から数千ピクセルといった一般的な受光素子をもつカメラで一度にカバーする場合、受光素子上の星像のサイズは通常1ピクセルのサイズよりも相当に小さくなる。このとき、恒星の光が背景の空の光に埋もれないためには、1ピク

セル辺りの空を見込む角度 (ピクセルスケール) を十分小さくすることが望ましい。例えば、1秒角平方辺りの夜空の明るさを20等程度と仮定すると、5等星の恒星の明るさに対して1ピクセルに入る空の光を1/5程度以下に抑えるためには、

ピクセルスケールを 7.5×7.5 分角ピクセル $^{-1}$ 程度より小さくすることが望ましい。このピクセルスケールで全天をカバーするためには、 $1,400 \times 1,400$ ピクセル程度以上の画素数が必要となる。

また、昼間と夜間の空の明るさは8桁程度異なるため、カメラの露出時間（シャッタースピード）や絞りのサイズ、検出素子のゲイン（もしくは感度）は、この大きな明るさ変化に対応できるように広い範囲で設定変更可能であることも必要である。

これらの要件を満たすカメラとしては、市販のデジタル一眼レフカメラが安価で入手性も良い。多くのデジタル一眼レフカメラがPicture Transfer Protocol (PTP) 規格に対応しており、USB接続によりシャッタースピードなどをソフトウェア的に設定可能である。

一方、デジタル一眼レフカメラを用いる場合の問題点は、ミラーのはね上げ機構や機械的シャッターの耐久性である。デジタル一眼カメラのレリーズ耐久性の公称値は機種にもよるが10万から40万回程度と言われている。例えばモニタ画像を1分間隔で取得する場合、1年間の運用で26万回以上のレリーズ回数に達し、半年から数年で公称寿命を迎えてしまう。ミラーレスカメラや電子シャッターのみの機種が望ましいが、選定時には最適な候補が見当たらなかったことと、公称値を超えて使用できている例³⁾もあることから、今回は1年から数年でのカメラ交換もしくはオーバーホールを想定しつつ、デジタル一眼レフカメラを採用した。

2.3 熱設計

北大大学院理学研究院附属天文台のある北海道名寄市は、冬季は積雪が多くまた気温が -30°C を下回ることもあるほど低く（年間を通して夜間は湿度も高い）、冬季の温度環境に関しては大学間連携内の観測所の中で最も厳しい条件をもつサイトである。このため、要求項目3)と4)に関しては名寄市での運用で要求を満たすように設計

できれば良いと考えられる。

気象庁のアメダスデータ⁴⁾によれば、名寄におけるここ最近10年の降雪時の日最大1時間降水量は10.5 mm（2010年11月）である。したがって、雪の温度を -30°C と仮定すると、ハウジング上面（約 40×30 cm）に降り積もる雪の融雪には最大で約140 Wが必要となる。最終的に、ハウジング上面を 5°C 程度に保つこととし、融雪用ヒーターのパワーは余裕をみて200 Wとした。

スカイモニタのドームウインドウに曇り（結露）を生じさせないためには、ドーム内側表面の温度を露点温度より高く保つ必要がある。例えば、ハウジング内の気温が 25°C で相対湿度が30%の場合、露点は 6.2°C である。しかし、簡易的な伝熱計算を行うと、外気温が -30°C の場合では、ドーム内側表面温度は 0.7°C まで下がる見積となり、そのままでは曇りが生じる。湿度を20%未満とすれば露点は 0.5°C 未満となるが、余り低すぎる湿度はレンズやカメラの部品の劣化を招く可能性がある。そこで、湿度を30%より下げる代わりに、ドーム内面に風を当てて強制対流により熱伝達率を上げることで、ドーム内側表面温度を上げることとした。伝熱計算によれば、外気温が -30°C かつハウジング内の気温が 25°C のとき、ドーム内側表面温度を露点より大きくするためには、ドーム内側表面での熱伝達率を $18 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ より大きくする必要がある。ここで、ユルゲスの実験式 $h=5.8+3.9v$ [ただし、 h は熱伝達率 ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)、 v は風速 (m s^{-1})] を仮定すると、必要な風速は 3.1 m s^{-1} 以上となる。この要件を満たすため、ハウジング内にノズル付きのファンを置き、 6.8 m s^{-1} 程度の風をドーム内面に当てる設計とした。

2.4 露出調整

空の視認性を維持するためには、空の明るさ変化に応じて、常に最も適した露出設定を選択する必要がある。文献5)によれば、空の明るさ（照度）は、主に太陽高度の関数であり、 1.3×10^5 か

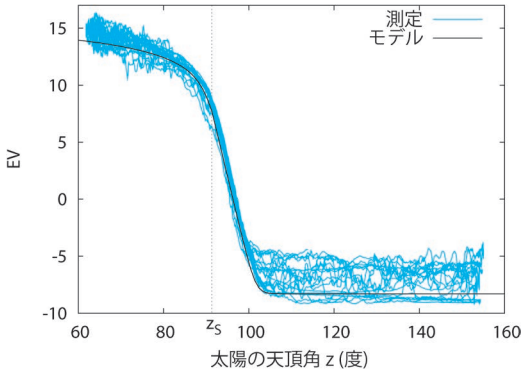


図3 太陽天頂角に対する空の明るさの依存性の測定値とモデル。測定値は2011年11月10日から19日の名寄における測定結果。 z_s は日没・日の出時の太陽の天頂角。

ら 2×10^{-3} lx 程度の範囲で大きく変化する。以下では、カメラの最適露出を計算する指標として、空の明るさを Exposure Value (E_V) の値に換算する。照度 L (lx) と E_V の関係式として、 $L = 2.1 \times 2E_V$ を採用すると⁶⁾、 E_V は 15.9 から -10.0 の範囲となる。図3は、スカイモニタを用いて測定した名寄における空の明るさ変化である。このデータを基に、日没・日出時の太陽の天頂角を z_s とし、昼間と夜間の空の明るさを表す実験式として、以下のモデルを構築した。

(1) 昼間：日出から日没まで ($0 < z \leq z_s$)

昼間の明るさは、太陽の天頂角 z の \cos 関数としてほぼ表すことができる。ここでは、式を z_s ($> 90^\circ$) まで連続させるため、 z の代わりに z/z_s でスケーリングした以下の式を採用した。

$$E_V(z) = \log_2 \left[\left(2^{E_V^{(Z)}} - 2^{E_V^{(S)}} \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{z_s} \right) \times \cos(-E_V^{(E)} X) + 2^{E_V^{(S)}} \right]$$

ここで、 $\cos(-E_V^{(E)} X)$ は大気吸収による減光を補正するための係数で、 X がエアマスに相当する。エアマスには以下の式を採用した^{7), 8)}。

$$X = \sqrt{x^2 + 2 \times 750 + 1} - x$$

ただし、

$$x = 750 \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{z_s} \right)$$

とした。

(2) 夜間：日没から日出まで ($z_s < z$)

夜間は、薄明の時間帯は指数関数的に変化し、深夜は月明かりがなければ、ほぼ一定の値となる。

$$E_V(z) = \log_2 \left(2^{E_V^{(S)} + E_V^{(L)}(z - z_s)} + 2^{E_V^{(N)}} \right)$$

モデルのパラメータには、名寄での実測値を基に、以下の値を採用した。

$$E_V^{(Z)} = 15.0$$

$$E_V^{(S)} = 7.8$$

$$E_V^{(N)} = -8.3$$

$$E_V^{(L)} = -1.56$$

$$E_V^{(E)} = 0.05$$

これらは、それぞれ、太陽が天頂に達したと仮定したときの明るさ ($E_V^{(Z)}$)、日出・日没時の明るさ ($E_V^{(S)}$)、深夜の明るさ ($E_V^{(N)}$)、薄明時の明るさ変化のスロープ ($E_V^{(L)}$)、エアマス当たりの大気減光率 ($E_V^{(E)}$) を表す。

ここで示した実験式は、快晴時かつ新月期の明るさ変化にほぼ対応する。雲や月明りがあると、空の明るさは、図3における測定データで示されるような、実験式からのずれを示す。そこで、実際の露出制御に当たっては、この実験式による系統的な変化に、直前の過去数枚のスカイモニタ画像から求めた実験式からのずれの量を補正値として加えている。そのようにして求めた現在の空の明るさの推定値 E_V から、 $\log_2(100F^2/ST) > E_V$ を満たす、最も明るいカメラ絞り F 値 (F) および最も高い ISO 感度 (S) と最も遅いシャッター速度 (T) の設定可能値の組み合わせを選択している。

2.5 ソフトウェア

カメラは、Linux 上にて gPhoto プログラム⁹⁾ を利用して制御している。ソフトウェアは、C 言語で書かれバックグラウンドプロセスとして実行

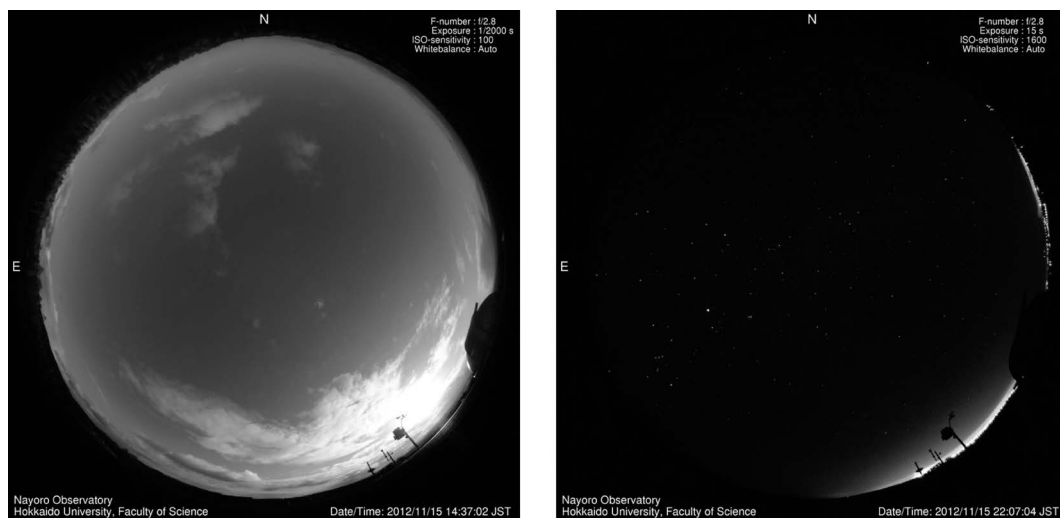


図4 北海道大学大学院理学研究院附属天文台のスカイモニタ画像（左：昼間，右：夜間）。

される，適切な露出設定を選択しながら定期的にデータ取得を行うサーバープログラムと，取得画像のトリミングや文字入れ，地平座標グリッド入れなどを行ういくつかのコマンドスクリプトから構成される．採用したデジタルカメラでは，カラー補間やガンマ補正処理後のJPEG画像と同時に，無処理のRAW形式の画像も取得できるため，空の明るさの測定は，RAW画像にて行っている．スカイモニタ画像は取得後直ちに公開Webサーバーに転送し，観測者や研究代表者がどこからでも常に最新の天候状況を確認できるようにした*2．図4に北大大学院理学研究院附属天文台におけるスカイモニタ画像の例を示す．ソフトウェアは，ほかの観測所でもプログラムに変更を加えることなく使用できるよう，各種パラメータの設定部分は設定ファイルとして分離した構成となっている．

2.6 観測所への配備

北大用スカイモニタは，2011年11月に名寄へ設置し，運用を開始した．当初ハウジングの水漏れの問題が発生したが，ほかに特に問題はなく，

現在まで運用継続中である．そして，北大用スカイモニタの製作とその設置後1年余りの運用実績をステップとして，次に東京工業大学の明野観測所に同一システムを導入し，2013年11月より運用を開始した．明野観測所への設置に当たっては，システムの設計を特に変更することなく，ソフトウェアの設定パラメータ変更のみで対応することができた．この2カ所の観測所への導入実績により，ほかの観測所への本システムの量産配布体制が整い，2015年からは鹿児島大学にも導入を進めている．

3. 望遠鏡・観測装置の運用状況一覧 Web ページ

観測開始のトリガーとなる天体現象が発生してから，研究代表者が望遠鏡と観測装置の運用状況を各観測所に個別に問い合わせるのは時間も手間もかかり非効率である．そこで，すべての観測所の機器の運用状況の情報をあらかじめWebページ上に集約かつ一覧表示し，連携事業参加者向けに限定公開することとした（図5）．これにより，

*2 例えば，北大のスカイモニタ画像は <http://sana.ep.sci.hokudai.ac.jp/nayoro/envmon/skymon/>にて確認できる．



図5 各日の望遠鏡・装置最新情報一覧Webページ。2週間以上更新が滞ると赤字表示になる。

研究代表者は、このページを参照するだけで、観測に使用可能な望遠鏡・観測装置を把握し、さまざまな確かな観測指示を出すことができる。また、CGIフォームの操作により、今後の任意の日数にわたる各観測所・装置の運用予定を一覧できるカレンダー形式の表示にも切り替えることができ、観測計画の立案にも役立てることができる。

運用状況の情報更新は、各観測所の担当者がWebブラウザ上で情報更新専用のWebページから情報を適宜更新することで行われる。これは、情報更新が容易である一方、更新の実行が各担当者の自主性に任せられるため、更新が滞りがちである。そこで、2週間以上更新が滞ると赤字表示になるなど、担当者に対する定期的な注意喚起を行い、更新を促す工夫を行った。

システムは、XHTML 1.0上で稼働するCGIをプログラミング言語Ruby (Version 2.0)を用いて開発し、Webサーバー上で運用している。

4. 観測補助情報の整備

多様な望遠鏡・観測装置を連携させた多地点連携観測を円滑に実施するためには、機器の運用状況のほかにも、以下のようなさまざまな情報が必

要となる。

- ・望遠鏡・観測装置の仕様
- ・望遠鏡ごとの指向可能高度
- ・各観測所の連絡先（電話番号、Skype、TV会議、担当者携帯電話番号など）

そこで、これらの情報をWebページやWikiページに集約し、観測計画の立案時や遂行時に容易に参照できるよう、情報整備を行った。

5. まとめと今後

本稿では、光・赤外線天文学大学間連携事業において、多地点かつ多様な望遠鏡・観測装置を連携させた、突発天体や時間変動天体の観測を円滑に行うための、観測環境整備の取り組みについて紹介した。

曇りがちな気候の日本国内をベースとした観測ネットワークにおいて、観測機会を逃さず、できるだけ漏れのない観測を実現するためには、各観測所の天候状況の把握が重要であり、本稿で紹介したスカイモニタシステムはその実現に一役買っている。今後の展開としては、スカイモニタのさらなる配備を進めつつ、雲の自動判別や晴天領域の検出などの機能追加が考えられる。後者が実現できれば、自動観測や晴天率の統計値測定などへの応用が可能であろう。

本稿で紹介した観測環境整備の取り組みにより、研究代表者が各観測所の天候や運用状況を把握しながら観測をアレンジし、各観測所へ観測指示を行うことは容易になった。一方、各観測所において実際にどのように観測が実行されているかを研究代表者が把握するための観測環境については整備が不十分である。現在は、主に、観測ネットワークのメーリングリスト宛に、各観測者が個別に観測状況を適宜電子メールで報告する形をとっているが、一覧性やいくぶんリアルタイム性に欠けるため、観測状況全体を把握しづらい。今後は、例えば、観測状況情報を逐次かつ即時集約できるWebページの整備などが必要であろう。

謝 辞

北大におけるスカイモニタの製作に当たっては、北大理学部機械工作室に一部部品の機械加工をしていただいた。

参考文献

- 1) 浦口史寛ほか, 2000, 国立天文台報4, 181
- 2) 保田知則, 2005, 卒業論文 (広島大学)
- 3) 永安真弓, 2010, 卒業論文 (広島大学)
- 4) 気象庁・過去の気象データ検索 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 5) Seidelmann P. K. (Ed.), 1992, Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac (Mill Valley, CA: University Science Books)
- 6) Kerr D. A., 2007, APEX—The Additive System of Photographic Exposure (<http://dougkerr.net/Pumpkin/articles/APEX.pdf>)
- 7) Allen C. W., 1973, Astrophysical Quantities (3rd ed.; London: University of London, Athlone Press)
- 8) Ball J. A., 1975, Algorithms for the HP-45 and HP-35 (Rev. ed.; Cambridge, MA: Center for Astrophysics, Harvard College Observatory & Smithsonian Astrophysical Observatory)
- 9) gPhoto ホームページ (<http://www.gphoto.org/>)

Construction of Observation Environment for Efficient Cooperation of the Telescopes in the OISTER Network

Makoto WATANABE¹⁾ and Hiroshi AKITAYA²⁾

¹⁾ Department of CosmoSciences, Hokkaido University, Kita 10 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

²⁾ Hiroshima Astrophysical Science Center, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: The Optical & Near-Infrared Astronomy Inter-University Cooperation Program is performing observational programs of newly discovered targets and time-variable objects in cooperation with many 1-m class optical and infrared telescopes all over Japan and oversea sites. These programs require the quick starting and continuity of observations, therefore, the principal investigator of their programs have to get quickly the latest operational states of all the telescopes and instruments as well as the weather conditions of all observatories in order to give an appropriate direction to each observatory according to the latest situation. We built all-sky monitors for several observatories and also constructed the web site that provides the summary of the latest states of all telescopes/instruments and other helpful information.