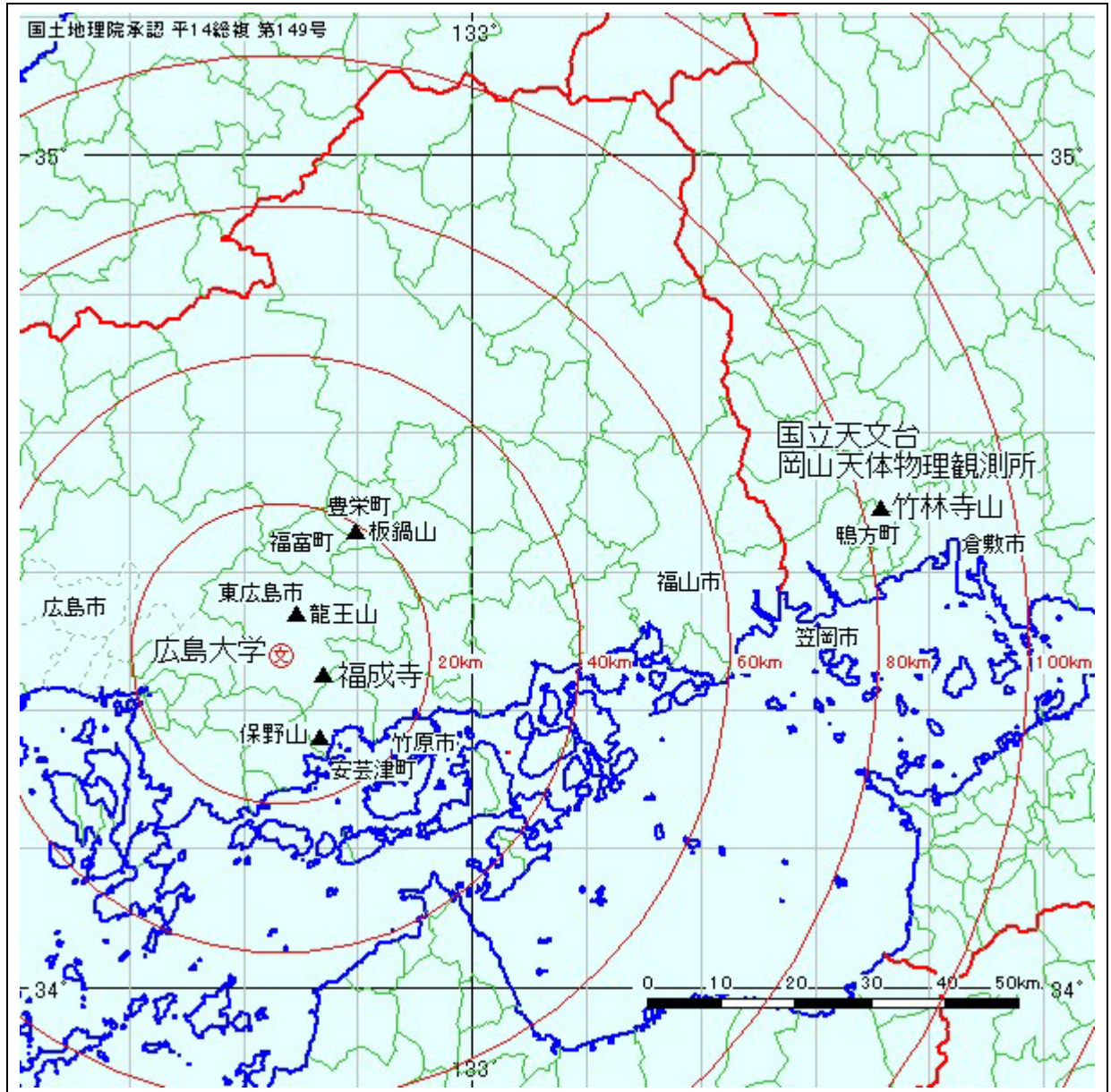


1.5m 望遠鏡（赤外シミュレーター）移設候補地 サイト調査 報告書



広島大学東広島キャンパス（文）と各調査地点（○）との位置関係（「白地図 KenMap」の地図画像を編集）

2004年7月28日 広島大学 宇宙科学センター

序文

西日本における宇宙科学研究・教育の基盤強化の一貫として、国立天文台三鷹キャンパスに設置されている赤外シミュレーター（1.5m 光学赤外線望遠鏡）を西日本の適地へ移設し、広島大学及び主として西日本地域の大学の天文学研究と教育に十二分に活用するとともに、シミュレーター機能の継承を行う計画が、広島大学宇宙科学センター（2004年4月発足）を中心に進められている。広島大学の主な研究目的は、ガンマ線サーベイ衛星 GLAST および X 線衛星 Astro-E2 と密接に連携した高エネルギー天体の多波長観測であり、共同利用サービスにも配慮しつつ、目的に特化した観測システムの整備も自身で行うことにより、開発基盤強化にも努める。望遠鏡の移管は 2004 年 3 月に完了し、2005 年度中には移設が行われる見込みである。

移設候補地としては当初、シーイング環境に優れ、望遠鏡・施設の維持に現地職員の協力が見込まれる国立天文台岡山天体物理観測所が想定されていた。広島大学と岡山天体物理観測所（以降、岡山観測所と略して表記する場合がある）とは、高速道路を利用した自動車の移動で、約 1 時間半の距離である。一方、大学付設の望遠鏡として考えてみると、院生・学生の研究教育のほか、教員の研修や周辺地域の科学リテラシーの高揚といった面での活用も期待され、その場合にはより大学の近郊に設置することが望ましい。ただし、観測研究利用を第一目的とする当移設の場合には、独自の人員体制を整備することはもちろんであるが、候補地のシーイングや気候といった科学的な観測環境が第一に満たされなくてはならない。一方、世界に目を向けると、各地で口径 10m を超える超大型望遠鏡の計画が進められると共に、中小望遠鏡によるサイエンスの競争はより厳しさを増しており、整備時間への余裕はない。口径 1.5m の望遠鏡の潜在能力を発揮して世界をリードする研究成果を挙げるには、科学的条件のほかに、インフラを整備していち早く建設が進められる社会的条件も満たす土地を、限られた時間の中での確に選定する必要がある。

本報告では、昨年来進められている広島大学近郊のシーイング・気象調査結果に加えて、2004 年 3 月 10 日に開かれた国立天文台光赤外専門委員会および 3 月 24 日に開かれた光学天文連絡会での承認事項に従い、広島大学近郊の候補地（福成寺周辺）への移設に関わる具体的検討および実務作業の経過を報告して、その妥当性を整理するものである。皆様には是非ご一読頂き、忌憚なきご意見をお寄せ頂くようお願い申し上げます次第である。

広島大学 宇宙科学センター 大杉 節、川端 弘治



目次

序文	1
1. サイト調査の目的	3
2. 研究計画の概要	5
2.1 研究計画	5
2.2 望遠鏡運用計画	5
3. 前期シーイング測定による候補地の絞込み	7
3.1 活動経過	7
3.2 前期シーイング測定	7
3.3 福成寺と岡山天体物理観測所における同時シーイング測定	9
4. 福成寺周辺の観測環境	11
4.1 福成寺周辺の地理環境	11
4.2 シーイング	12
4.3 夜空輝度	14
4.4 気象	16
5. 福成寺周辺における土地調査と移設場所の選定	27
5.1 周辺地域の道路建設および土地造成に関わる諸条件	27
5.2 第一候補地における試掘調査	28
5.3 設備配置案（暫定）	32
6. まとめ	34
6.1 福成寺での 1.5m 望遠鏡における観測限界	34
6.2 福成寺移設の場合の年次計画	35
謝辞	37
参考文献	38

1 サイト調査の目的

国立天文台（NAOJ）より広島大学に移管された 1.5m 光学赤外線望遠鏡（赤外シミュレーター；図 1.1）の移設先の選定作業が進められている。当望遠鏡は第一線の科学計測に供されることから、立地場所には観測環境に関する科学的条件を満たすことが厳しく要求される。また、ガンマ線・X線衛星と連携した観測研究を滞りなく推進するためには、該当する土地の整備や施設建設の具体的な見通しも得なくてはならない。

光学（赤外線）観測を行う場合の観測環境に関する科学的条件として一般に、

- シーイングの良さ
- 夜空輝度の低さ
- 夜間晴天率の高さ（高湿度状態の少なさも含む）

が求められる。

シーイングとは、地球大気による擾乱を受けた恒星像の見え具合を指す指標である（図 1.2）。非常に遠くの天体からやってくる光は、理想的な点光源であり、理想的な平面波として地球へ届くが、地球大気内の温度（屈折率）の不均一性によって波面が乱され、結果として恒星像はぼんやりと広がったものになる。自然界においてシーイングを劣化させる要因は、上空の層流境界における温度乱れと、地表付近の接地境界層における温度乱れとに大別される [1][2][3]。前者は大局的な気象条件によるが、後者は周辺の地形や植生、建築物が風の流れの障害物となることによって発生する大気擾乱、および都市などの熱源が生む陽炎などといったローカルな要因に支配される。シーイングは撮像観測における空間分解能や分光観測の能率を大きく左右する重要な条件であり、シーイングの乱れが少ない場所を特定することは、望遠鏡立地場所を選ぶ上で特に重要なパラメーターである[2]。

夜間の都市光は、光学観測において背景光を増加させ、測定精度を劣化させる要因となる。究極的に暗い夜空を求めると、都市圏から遠く離れた地域を選ぶことが本質的に必要となるが、望遠鏡へのアクセスの悪化や施設整備にかかるコストの増大は避けられない。なるべく暗い夜空が望ましいことは変わらないが、今回は、現地の夜空輝度が我々の目指す研究や主たる利用目的において支障がないことを確認することを条件とし、その中では岡山天体物理観測所の夜空輝度と比較することを試みる。

夜間晴天率は地上観測を行う上で本質的に重要である。全国的に見ても瀬戸内地方は降水量が少なめで晴天率が高いと言われているが、ローカルな気象の傾向を把握することは必要である。特に、高湿度下では結露により鏡面が曇り、観測が不能となるほか、鏡面を劣化させる原因ともなるため、夜間の湿度変化や霧の発生については特に注意しなくてはならない。

これらの科学的条件が満たされた上で、候補地周辺の土地調査を行う。具体的には、設備配置計画の策定、埋蔵文化財の有無、土地取得（借り上げ）に関わる交渉、各種法令の照会、取り付け道路の整備や整地に関する調査結果について検討した上で、その工期や費用が本来の研究計画と見合うものであるかどうかを見極める必要がある。

本報告は、これらのサイト調査の結果について報告することが第一の目的である。また、同時にその結果に基づいて、望遠鏡立地に相応しい候補地を選定すると共に、参考のため現状での施設設備計画や年次計画を紹介する。

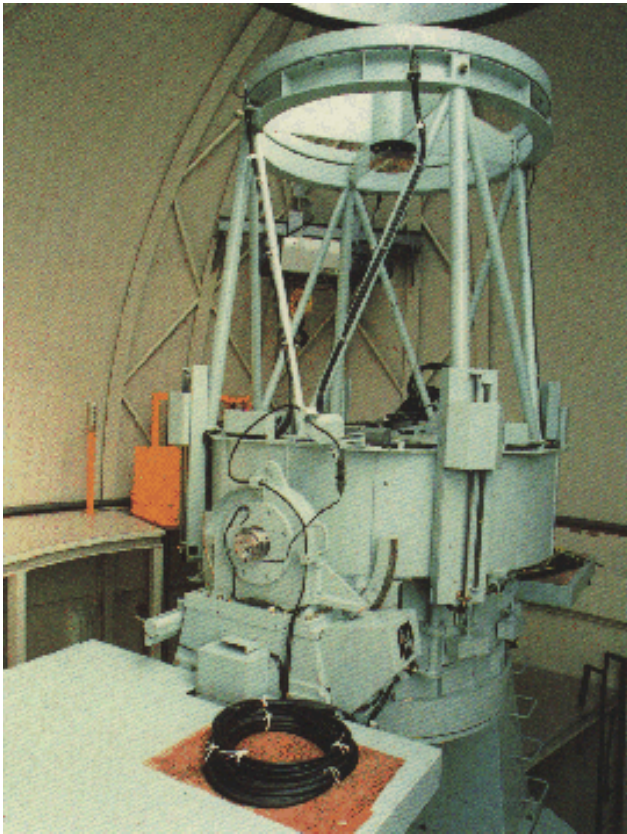


図 1.1 1.5m 光学赤外線望遠鏡（赤外シミュレーター）の外観
（©国立天文台）

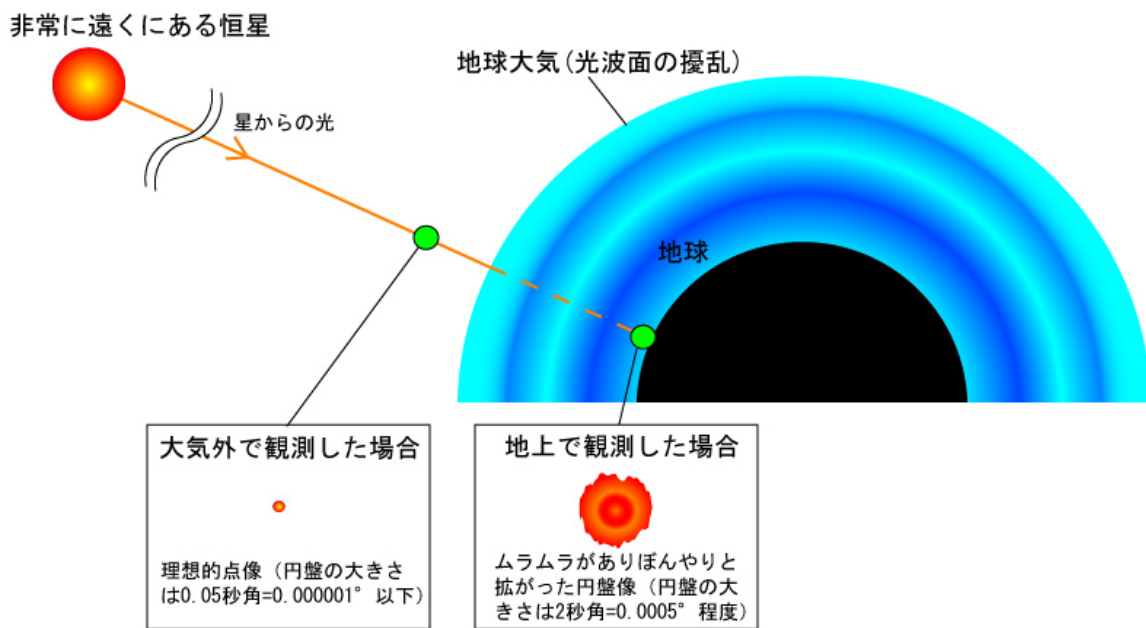


図 1.2 シーイングの模式図。非常に遠方であり理想的点像である恒星像は、地上から観測する場合、地球大気による光波面の擾乱を受けて拡がり、観測に悪影響を及ぼす。シーイングとは一般に恒星像の見え具合を表す言葉であるが、シーイングサイズ（像輝度分布断面の半値幅）を単にシーイングと表記する場合もある。

2 研究計画の概要

2.1 研究計画

X線やガンマ線を用いた高エネルギー天文学は、ダイナミックな高エネルギー現象・極限状態の物理現象が、宇宙に満ちていることを明らかにしてきた。銀河の中には、星の進化の最終段階としてのブラックホールや中性子星が、さらに銀河中心には巨大なブラックホールが存在し、宇宙空間に莫大なエネルギーを解放している。また、数千万度という高温ガスが、銀河の中のみならず、銀河の集団である銀河団の数百万光年にわたる広大な空間に広く存在している。これらのダイナミックな非平衡状態の天体現象は、可視光や赤外線、電波などのエネルギーの低い電磁波のみでは情報を得ることが困難であり、X線やガンマ線を用いることで初めて明快に示されたものも多い。

広島大学大学院理学研究科宇宙・素粒子科学講座に属する高エネルギー宇宙・素粒子実験グループ及び宇宙物理学研究室（理論天文学）では、X線天文学やガンマ線天文学の研究を推進している。特に、高エネルギー宇宙・素粒子実験グループは、2007年NASA打上げ予定のガンマ線望遠鏡衛星GLASTや、2005年JAXA打上げ予定の日本のX線天文衛星Astro-E2の開発にも深く関わっている。GLASTにおいては検出器の主要部品を担当しており、その寄与は大きい。MeV-GeV領域のガンマ線天文学はまだ揺籃期にあり、GLASTによってこのエネルギー領域の天文学研究が一気に加速することは明らかである。Astro-E2において広島大は主に硬X線検出器の開発に携わっているが、この検出器がカバーするエネルギー領域はX線の中でも高い方に位置し、ガンマ線衛星観測との連携が最も期待される領域である。

広島大学宇宙科学センターは、これら既存のグループと密接に連携して、次期高エネルギー天文衛星が観測するデータへの高いアクセシビリティを活かし、1.5m望遠鏡による光学赤外線観測と両衛星のデータを連携した、独自性の高い多波長観測研究を進めることを計画している。具体的には、

- ガンマ線バースト光学残光の機動的観測による高エネルギー物理過程の解明、および深宇宙探査
- 未同定ガンマ線源天体の光学同定
- ブラックホール天体の質量降着過程およびジェット放出過程の解明
- 超新星の爆発過程の物理とガンマ線バーストとの関連

の4つの研究テーマを想定している。いずれのテーマも、X線やガンマ線だけではなく、光赤外を加えた多波長連携で観測を行い、可視近赤外光の光度曲線やスペクトルから得られる多様で正確な情報を利用することで、理解が大きく前進することが期待されるものである。これらの観測計画を効率良く推進するには、1.5m望遠鏡の観測時間を重点的に投入して観測を行う必要がある。特に、ガンマ線バーストの観測については、アラートが報じられた夜には、すべてに優先して望遠鏡をガンマ線バーストに向ける必要がある。このような非汎用型で、研究プロジェクトに特化した運用形態は、国立天文台のような大学共同利用機関に属する大型望遠鏡では現在のところ難しく、逆に大学附設の望遠鏡では特長となる。我々は、これまでの高エネルギー天文学と光学観測天文学の実績を活かして、独自のユニークな高エネルギー天体の観測研究を進めながら、西日本における宇宙研究の新しい拠点の形成を目指し、将来の宇宙科学研究の発展に資する人材を多く排出することも目標とする。

2.2 望遠鏡運用計画

同望遠鏡は広島大学の研究開発に用いるほか、シミュレーターとしての機能継承の必要性を鑑み、全国共同利用の形態で望遠鏡時間の一定枠を提供し、支援することにより、国内の装置開発能力および観測研究の機動性の向上に資する。また、中四国・九州地方における初めての本格的な宇宙科学研究の大学拠点として、我が国の宇宙科学研究の発展に大きく貢献すると共に学生の大きな教育需要に応える。

1.5m望遠鏡へ装置を取り付けるポートは、カセグレン焦点とナスミス焦点の2つがある。焦点の切

り替えは、現在は手作業による第3鏡の着脱により行われているが、電動で素早く焦点を交換できる機構を導入する予定である。2つの焦点のうち、ナスミス焦点は基本的に広島大が占有し、ガンマ線バーストの機動的光学観測やガンマ線源の光学同定に用いる広視野(10分角)カメラを常設し、常に観測可能な状態に保つ。一方、カセグレン焦点は、装置開発や共同利用に供し、用途によって広島大が開発する分光器や、その他の持ち込み装置を取り付けられるようにする。望遠鏡時間枠について、広島大学に50%、装置開発と共同利用に30%、センター長時間(メンテナンス、突発天体の共同利用、施設公開などの機動的運用)に20%を充てることを検討している。

また研究利用に支障が無い範囲の中で、当望遠鏡を本学や近隣大学学生、及び地域社会における宇宙科学・天文学・科学リテラシー高揚の起爆剤として利用し、本センターの研究成果のわかりやすい形での公表に努めたいと考えている。具体的には、本センター施設の研修・セミナー等への一部利用を認める予定である。施設の夜間の一般公開について明確な方針は決まっていないが、望遠鏡を通した天体映像や観測所から見た夜空画像の配信を行う予定である。ライブ画像配信や観望会については本学大学院教育学研究科自然システム教育学講座(林武広教授)において多数の実績があり、50cm光学望遠鏡(教育学研究棟屋上)やその他小望遠鏡と連携した地域貢献を企画する。

3 前期シーイング測定による候補地の絞り込み

3.1 活動経過

2003年5月より、岡山天体物理観測所構内において移設候補地を含む数箇所でシーイング調査が行われた。これは、京都大学や岡山天体物理観測所との協力で行われたものである。測定に用いた装置は、DIMM (Difference Image Motion Monitor) 2つで、ここで紹介するデータは、主として京大望遠鏡 WG により開発された可搬型の DIMM (図 3.1; 以下、京大 DIMM) によって得られたものであるが、一部、国立天文台で開発され、太陽クーデ 65 cm 望遠鏡に常設されている DIMM (図 3.2; 以下、太陽 DIMM) を用いて得られたデータも含む [4][5][6]。DIMM は、一定間隔離れた二つの望遠鏡開口を用いて同じ星を撮影し、二つの星像の重心位置の相対的な揺らぎ (= 時間的変動) を測定する装置である。その揺らぎの量からシーイング、すなわち星像の大きさ (正確には、輝度分布の半値幅) を定量的に評価することが出来る [7]。各 DIMM の積分時間は、京大 DIMM が 6.7 msec、太陽 DIMM が 10 msec である。2003年5月から8月にかけて、構内の移設候補地も含めて重点的なシーイング測定が行われた。



図 3.1 京大 DIMM



図 3.2 太陽 DIMM

一方、東広島市周辺でのシーイング測定は、京大 DIMM を借り受けて 2003 年より行われた [5]。まず 5 月に広島大学構内、及び至近の山で車でのアクセスが可能な龍王山において測定が行われたが、パルスジェネレーターの故障のため正確な値が得られなかった (正確にはシーイングの下限値が得られた)。その後、9 月から 12 月にかけて、広島大学構内の他、豊栄町板鍋山、東広島市福成寺付近、および安芸津町保野山にて、各所複数回のシーイング測定が行われた (表紙の図を参照)。この結果、福成寺においてのみ、岡山観測所に匹敵する好シーイング値が得られたため、その後年末に掛けて、度々観測を行った。そのうち 2 晩については、岡山観測所職員の協力を得て岡山太陽クーデとの同時測定も行った。図 3.1 および 3.2 に測定地点を图示する。

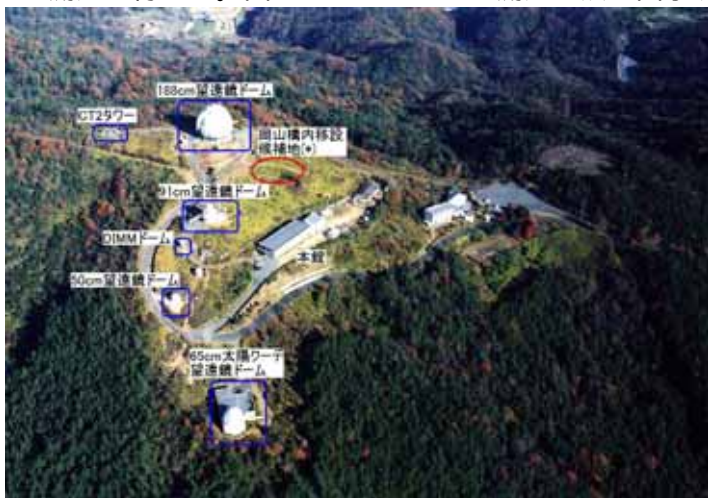


図 3.1 岡山天体物理観測所構内のシーイング測定地点 (岡山観測所が所有する写真画像を編集したもの)



図 3.2 東広島市近郊のシーイング測定地点 (「白地図 KenMap」の画像を編集) 注は、測定地点が山頂ではなく、地図から求めた標高であることを指す。

3.2 前期シーイング測定

2003年に岡山観測所構内および東広島市近郊で行われたシーイング測定の結果について紹介する。個々の詳しいデータとその議論については、上田(2004)[5]および岩田(2003)[4]を参照して欲しい。ここでは要約のみを述べる。岡山観測所における各測定日の統計データを表3.1、東広島市近郊の統計データを表3.2に示す。京都 DIMM は約 20 秒、太陽 DIMM は約 0.3 秒にそれぞれ一点の測定結果を記録するようになっており、この表に載せてある結果は、それぞれの DIMM による一晩中の多数の測定点から、中央値や最頻値(0.1 秒角刻み)などを求めたものである。

岡山における測定は、春季に 5 晩(うち 4 晩は太陽 DIMM, 京大 DIMM の両方で測定) 夏季に 3 晩、冬季に 2 晩行った。二つの DIMM で同時に測定が行われた 4 晩のデータを比べてみると、2 晩は太陽クーデの方がより良いシーイング値を示し、他の 2 晩は京大 DIMM の方が良い値を示している。両者の比較について、有効波長の違いや積分時間の違いが及ぼす影響は(後者は風速モデルにもよるがいずれにせよ) 5%以下で、測定精度に比べて無視できると考えられるが [7][8]、測定値が拮抗していることはこれと矛盾が無い。単純に季節ごとの中央値の平均をとってみると、春季 1.2 秒角、夏季 1.2 秒角、冬季 1.3 秒角となる。いずれの季節も 1 秒台前半の値が出ていることになる。1997 年から 2001 年にかけての 188cm 望遠鏡カセグレンオートガイダーの直接撮像データ解析によるシーイング統計によると、平均 1.4-1.5 秒角という値が得られているが [9]、これはドーム内シーイングや光学収差の影響で多少悪化していると考え、今回の結果と矛盾がない。

東広島市近郊においては、装置の故障のため測定が不良であった 5 月を除くと、9 月から 12 月にかけて測定が行われた。参考のため、広島大学の構内において、理学研究科 C 棟と教育学研究科 C 棟のそれぞれ屋上で行われた測定では 1.6-2.4 秒角という結果であった。付近からは絶えず熱が放射されていることを考えると、このような悪い値が得られるのも不思議ではない。

東広島市近郊の測定場所については、東広島市企画部企画課の協力で作成いただいた、山頂付近まで道やインフラが整備されている山のリストも考慮して、内陸の豊栄町板鍋山から南へ順に、東広島市龍王山、東広島市福成寺、そして瀬戸内海沿岸の安芸津町保野山までの 4 箇所が選ばれた。このうち龍王山では、装置故障のため正確な結果は得られていないが、シーイング値は 1 秒台後半より悪いと概算されるほか、光害がひどいことから、移設候補地からは外し、追測定は見送った。

板鍋山では、秋季に 2 晩の測定が行われた。いずれも快晴夜で、麓ではほとんど風が無い状況での測定であったが、山頂は比較的風が強く、2 晩とも中央値で 2 秒角前後、1 秒角以下の割合が 2%という結果であった。板鍋山は標高 757.2 m で、標高 350-500 m の内陸型高原台地を、天神獄(757.5 m)、西原山(733 m)などと共に囲むローカルな孤立峰である。周囲で視界を妨げる地形は特に無い(但し、放送用アンテナなどの鉄塔が乱立しており望遠鏡の建設には不適のように思われる)が、測定結果は周辺のシーイング環境があまり良くは無いかを示唆している。

保野山では、12 月初旬に 2 晩の測定が行われた。諸事情から標高 296 m の保野山頂ではなく、西へ 500m ほど離れた標高約 280m のピークにおいて測定がなされた。2 晩の中央値はそれぞれ 1.4 秒角、1.8 秒角となっており、広島大学構内や板鍋山よりは良いシーイング環境にあると言えるが、平均 1.2 秒角の岡山観測所とくらべると見劣りがする。

一方、福成寺であるが、最初の測定日に台風(21 号)くずれの発達した低気圧が支配する強い冬型の気圧配置で風も強い状況下において中央値 1.8 秒角という結果が得られたものの、それ以外の 6 晩については、冬型の気圧配置の日も含め、中央値で 0.9-1.4 秒角と、岡山観測所に比べても遜色ない値が得られた。冬場は、日本上空の圏界面を時速 100-200km のジェット気流が横切り、大気中のせん断運動による温度乱れが促進されるためにシーイングが悪化すると考えられているが [2][3]、それでも 1 秒台前半の値を平均的に出していることは、福成寺周辺のシーイング環境が、岡山観測所程度に良いことを示していると考えられる。

表 3.1 岡山天体物理観測所構内における 2003 年シーイング測定結果

測定場所	測定日	シーイング (星像輝度分布の半値幅)		
		中央値(秒角)	最頻値(秒角)	1 秒角以下の割合
太陽クーデーム内 (太陽 DIMM)	2003-05-01	1.1	1.0	38 %
	2003-05-02	0.8	1.0	74 %
	2003-05-27	1.3	1.1	17 %
	2003-05-28	1.5	1.2	8 %
	2003-12-16	0.8	0.6	90 %
	2003-12-24	1.7	1.6	1 %
太陽クーデ屋上	2003-05-01	1.2	1.0	28 %
	2003-05-27	1.0	0.7	49 %
	2003-05-28	1.2	0.9	36 %
移設候補地	2003-05-02	1.3	1.2	12 %
	2003-08-02	1.2	1.1	18 %
CT2 タワー	2003-07-31	1.4	1.3	6 %
	2003-08-01	1.0	0.8	50 %
DIMM ドーム	2003-05-29	1.5	1.3	3 %

表 3.2 東広島市近郊における 2003 年シーイング測定結果

測定場所	測定日	シーイング (星像輝度分布の半値幅)			コメント
		中央値(秒角)	最頻値(秒角)	1 秒角以下の割合	
広島大学 理学研究科 (C 棟屋上)	2003-09-16	2.0	1.7	3 %	晴れ、微風
	2003-09-17	2.4	2.6	0 %	晴れ、微風
広島大学 教育学研究科	2003-08-06	1.6	1.6	3 %	晴 曇、微風
板鍋山 (標高 757m)	2003-09-26	2.2	1.4	2 %	快晴、弱風
	2003-10-08	1.9	1.9	2 %	快晴、弱風
福成寺 (標高 460m)	2003-12-01	1.8	1.5	2 %	晴れ、強風
	2003-12-03	1.1	1.1	44 %	快晴、微風
	2003-12-08	1.3	1.0	15 %	晴 曇、無風
	2003-12-10	1.4	1.4	24 %	薄曇、弱風
	2003-12-14	1.0	0.8	55 %	晴れ、微風
	2003-12-16	0.9	0.7	64 %	薄曇、微風
	2003-12-24	1.3	1.1	23 %	晴れ、弱風
保野山 (標高 280m)	2003-12-02	1.4	1.3	11 %	晴れ、微風
	2003-12-04	1.8	1.9	8 %	快晴、弱風

3.3 福成寺と岡山天体物理観測所とにおける同時シーイング測定

福成寺と岡山観測所とのシーイング環境の優劣を比較する手段のひとつとして、岡山観測所と同時にシーイングを測定することが挙げられる。福成寺と岡山観測所は東西に 80 km ほどしか離れておらず、標高差も 100 m 以下、瀬戸内沿岸からの距離も共に 10 km 程度とよく似た地理環境にあることから、大局的な気象条件で決まる上空のシーイング環境は、ほぼ同じであると仮定して良いであろう。すなわち、同時シーイング調査によって、ローカルな地形要因等で決まる接地境界層のシーイングへの影響の差が判断出来そうである。そこで、岡山観測所のスタッフの協力を得て、福成寺と岡山観測所とで同時シーイング測定が行われた。

結果を表 3.3 および図 3.3 に示す。これを見ると、12月16日は中央値で岡山が0.8秒角、福成寺が0.9秒角と、岡山の方が良い結果を出しているが、24日は岡山の1.7秒角に対し福成寺が1.3秒角と、福成寺の方が良い値を示している。参考までに、16日は高気圧に覆われた比較的穏やかな日であり、測定時の観測所構内は風速1 m/sec程度であったが、24日は冬型の気圧配置で、北寄りの5 m/secを超える風が測定中絶えず吹いていた。2晩だけの比較ではあるが、福成寺の方が、気圧配置によらずに安定したシーイング環境を示している。

この結果から、福成寺のシーイング環境は岡山観測所と同程度に良い、という観測事実がより信頼性を持つことになった。シーイング測定の結果は動かしようが無い観測事実である。福成寺は大学キャンパスや新幹線の駅からのアクセスも良く、立地条件は非常に良いことから魅力的ではある。半世紀前、全国規模の調査で岡山観測所の立地場所が選定されたことを考えると、このような好条件の場所に比較的短い調査で巡り合えたことは幸運である。しかし逆に、調査期間は短いけれども、80 kmしか離れていない岡山観測所の歴史があるからこそ、その比較によって福成寺の観測環境の良さが信頼できるのであるとも思われる。我々は、東広島市近郊での候補地を福成寺周辺に絞り、より詳細な観測環境や社会的条件の調査を進めることにした。

表 3.3 福成寺、岡山同時シーイング測定結果

測定日	地点	中央値 (秒角)	最頻値 (秒角)	1秒角以下 の割合
12月16日	岡山	0.8	0.6	90%
	福成寺	0.9	0.7	64%
12月24日	岡山	1.7	1.6	1%
	福成寺	1.3	1.1	23%

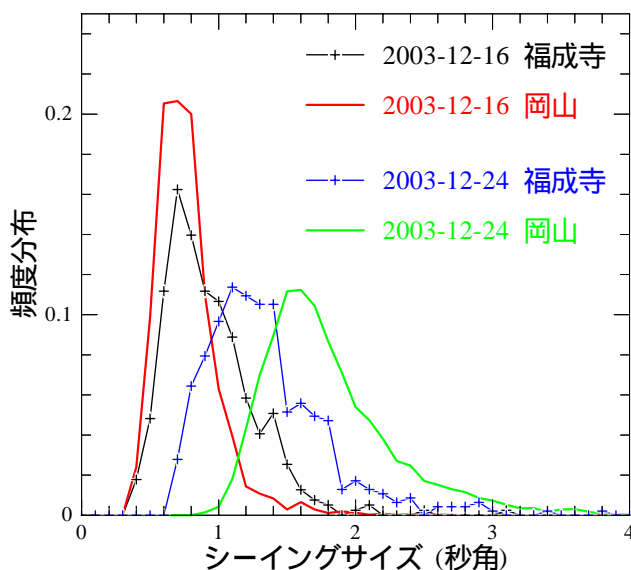


図 3.3 同時シーイング測定結果のヒストグラム

4.2 シーイング

2003年12月のシーイング調査により、福成寺周辺のシーイング環境が良いことがわかったが、シーイングは気象や地形的な要因により変わることが知られている。そこで、2004年4月から5月の入梅前に福成寺周辺の数箇所においてシーイング調査を行い、他の季節におけるシーイングはどうか、多少離れた場所ではどうかを把握する基礎資料を得ることとした。

4.2.1 シーイング測定結果

測定地点の選択は、機材運搬が可能な道路脇で視界も十分に得られる、という条件を満たす場所で、且つ、福成寺周辺の数箇所の移設候補地付近をなるべくカバーする、という基準のもとに行われた。測定地点を図4.3に示すとともに、測定地点の風景をいくつか図4.4に紹介する。なお、前節で紹介した2003年12月の測定はすべて、福成寺進入道で行われた。

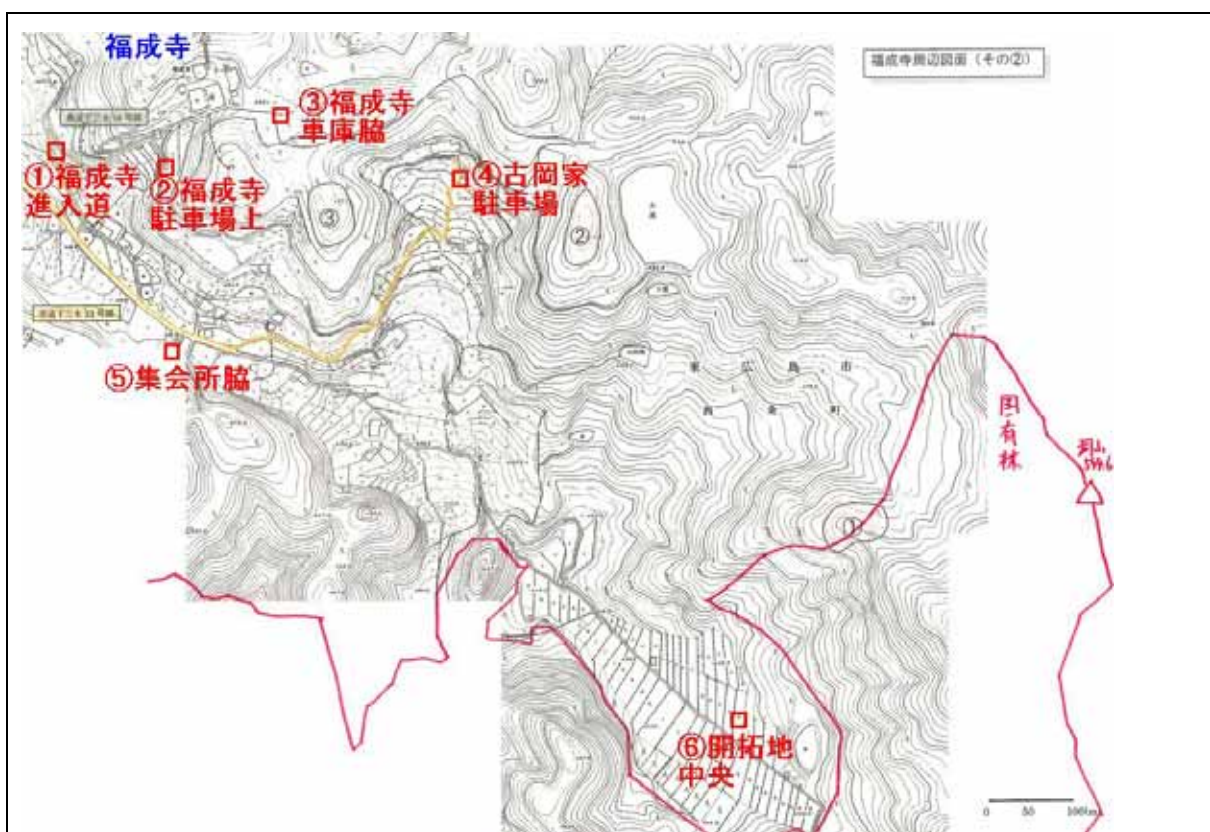


図 4.3 シーイング測定地点



図 4.4a 福成寺進入道



図 4.4b 福成寺車庫脇



図 4.4c 開拓地中央

4.2.2 シーイング測定結果

福成寺周辺におけるシーイング測定はすべて、京大 DIMM を借り受けて、各測定地点に持ち込ん

で行われた。すべての測定結果の統計量を表 4.1 にまとめる。図 4.4 には図 4.3 にシーイングの典型値を記入したものを載せる。福成寺周辺ではいずれも 1 秒台前半の値を記録している。

表 4.1 福成寺周辺におけるシーイング測定結果

	測定日	有効データ点数	シーイング (秒角)			# 秒角以下の割合	
			平均値と	中央値	最頻値	1.0	1.5
福成寺進入道	2003.12.01.	316	1.83 ± 0.45	1.79	1.5	2 %	23 %
	2003.12.03	580	1.07 ± 0.31	1.05	1.1	44 %	91 %
	2003.12.08	163	1.34 ± 0.35	1.31	1.0	15 %	68 %
	2003.12.10	423	1.45 ± 0.62	1.37	1.4	24 %	60 %
	2003.12.14	480	1.03 ± 0.31	0.96	0.8	55 %	93 %
	2003.12.16	394	0.94 ± 0.33	0.88	0.7	64 %	95 %
	2003.12.24	466	1.34 ± 0.45	1.26	1.1	23 %	73 %
	2004.04.29	471	1.23 ± 0.31	1.20	1.3	25 %	79 %
	2004.05.24	35	0.93 ± 0.24	0.87	0.8	66 %	97 %
2004.05.28	128	1.03 ± 0.28	1.01	0.9	48 %	95 %	
福成寺駐車場上	2004.05.10	106	1.24 ± 0.20	1.23	1.3	13 %	90 %
福成寺車庫脇	2004.05.11	120	0.87 ± 0.17	0.86	0.9	78 %	100 %
古岡家駐車場	2004.05.10	72	1.06 ± 0.21	1.05	1.2	39 %	96 %
	2004.05.14	305	1.53 ± 0.41	1.48	1.4	7 %	51 %
	2004.05.22	275	1.63 ± 0.37	1.61	1.8	2 %	39 %
	2004.05.23	343	1.40 ± 0.33	1.37	1.3	10 %	65 %
	2004.05.24	186	1.45 ± 0.39	1.40	1.4	10 %	61 %
	2004.05.28	79	1.52 ± 0.30	1.51	1.4	4 %	47 %
集会所脇	2004.05.05.	378	1.33 ± 0.38	1.25	1.2	15 %	75 %
開拓地中央	2004.05.06	200	2.22 ± 0.53	2.19	2.1	0 %	7 %

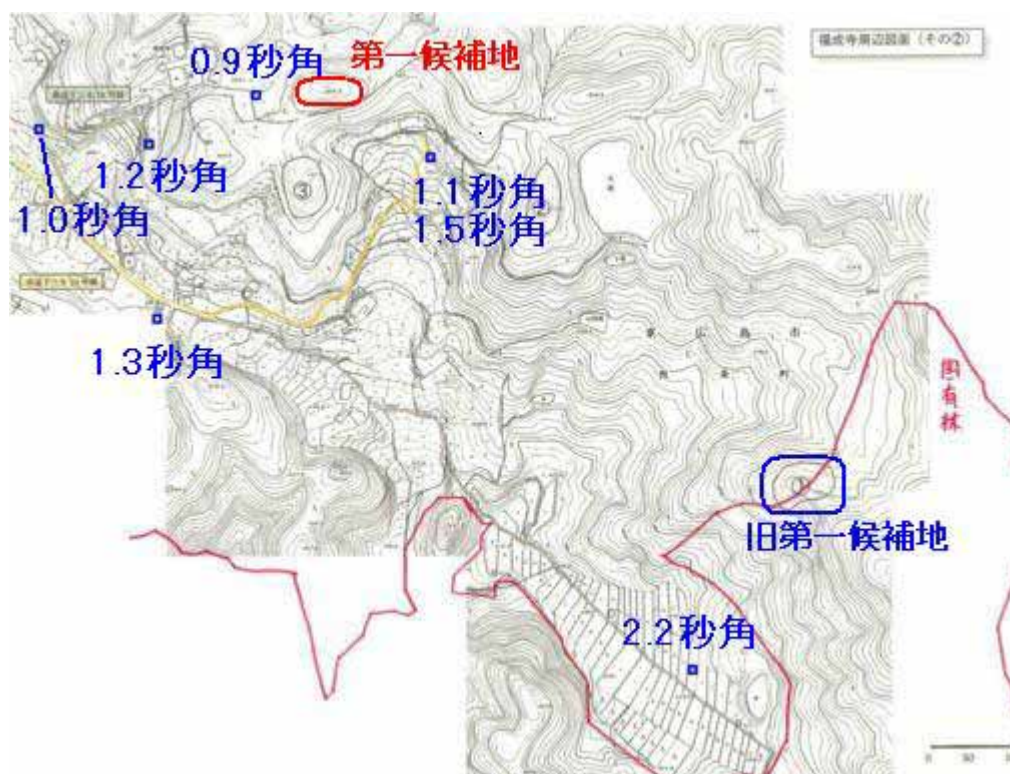


図 4.3 2004 年春季の福成寺周辺各測定地におけるシーイング典型値 (表 4.1)

福成寺周辺数百メートルほどの地域では、いずれも一秒台前半の好シーイング環境にあることがわかった。第一候補地について、詳しくは第 5 節を参照のこと。

4.2.3 福成寺周辺のシーイング環境

この結果をみると、福成寺を中心とする半径 400 メートルほどの地域はいずれも 1 秒台前半のシーイングを記録しており、一帯が好シーイング環境にあることがわかった。この中でも特に、昨年冬からシーイングを測定している 福成寺進入道では、春季も 1.2, 0.9, 1.0 秒角と安定して良い値を出していることは特筆に値する。この場所は、図 4.4a からわかるように道路が崖となって（直下の畑から約 5m の高さ）せり出したようになっており、他の場所に比べて接地境界層の影響が軽減されているのではないかと考えられる。

測定した中で最も良い値を記録した 福成寺車庫脇は、第一候補地（第 5 節参照）にほど近い鞍部にあるが、周囲は竹林で囲まれた窪地のようになっている。ここは、後に述べる気象調査で、周囲に比べて夜から明け方の湿度が高く推移しており、夜間の風の流れが止まることによってより良いシーイングが得られているという描像が得られる。一方、開けた窪地となっている 古岡家駐車場においてはシーイングがやや良くないようである。窪地になっていることで風の流れによる接地境界層の乱れの影響が出ているのかもしれない。この傾向が顕著なのは、南東に離れた場所にある開拓地である。高原状の土地であるが、周囲が高く窪地となっている場所である。軽四駆 2 台を都合して乗り込み、いざ測定したものの、シーイングは 2 秒角を越えていた。

より正確に判定するには測定を重ねる必要があるが、これらの測定から、少なくとも福成寺近隣数百メートルについては、岡山観測所と同程度のシーイング環境にあると言って良いであろう。シーイングには地形と風が影響すると考えられているので、より理解を深めるには気象測定結果も合わせて考慮することが求められる。福成寺周辺の気象測定結果について、4.4 節に述べることにして、次に福成寺周辺の夜空輝度について報告する。

4.3 夜空輝度

夜空による背景放射は光学観測においてノイズ源となるため、なるべく少ないことが望ましい。ここでは福成寺周辺における夜空輝度を測定して、岡山観測所における輝度と比較することを目標とする。

4.3.1 測定方法

測定は 2003 年 12 月 21 日、24 日、および 25 日に、京大望遠鏡 WG から借り受けた CCD カメラ一式（SBIG ST-7E、カメラレンズ $f=50\text{mm}$ 、フィルター HOYA HA-30+R-60）を用い、京大望遠鏡 WG とほぼ同様の方法で測定し、データ処理を行った [10]。すなわち、擬似的な Cousin- R バンドフィルターとカメラレンズを取り付けた CCD カメラを三脚に載せ、フォーカス合わせをした後（測光精度を出すため星の区別できる範囲で若干デフォーカスにする）、高度 30 度と 45 度において、方位角で 45 度ずつずらして、それぞれ 15 秒間露出することを繰り返した後、天頂付近で位置をずらしながら 10 枚露出する、というものである。測定地点は、図 4.3 における 福成寺進入道である。較正データについて、ダークフレームは測定の前後に撮影し、フラットフィールドフレームについては天頂のフレームからメジアン画像を得て代用する。測光の較正は、これらは別に多数撮影した標準星フレームから大気補正係数を求めて行った。このフィッティングから得られる 1 フレームあたりの誤差はおよそ ± 0.2 等となり、京大 WG の測定とほぼ同等の測定がなされたと言えよう。

4.3.2 輝度測定結果

快晴に恵まれた 12 月 21 日と 24 日の測定結果を図 4.4 に示す。測定は 19:00 前後と 21:00 前

後の二つの時間帯に行われた。この時期は新月期で、月の影響は皆無である。また、この時期の天文薄明終了は 18:30 頃で、太陽光の影響は含まれないと期待されるため、両者の時間帯での明るさの変化は市民活動によるものであると考えられる。この時間帯の変化は目で見ていても明らかであったが、21:00 以降については時間変化は目立たなかった。

図から、西条市街の方向である北西方向の明るさが際立っていることがわかる。21:00 における北西方向高度 30 度の輝度は、両日とも天頂に比べて 1.3 等 (3.3 倍) ほど明るくなっている。また比較的くらい東～南向きの空でも、高度 30 度では天頂に比べて約 0.5 等 (1.6 倍)、高度 45 度では約 0.3 等 (1.3 倍) ほど明るくなっている。通常の観測は、見通す大気の厚さが天頂の 2 倍を越えない高度 30 度以上で行われるが、月明かりが無い澄んだ日には、殆どの観測において背景光は 19 等級以下となることが期待される。

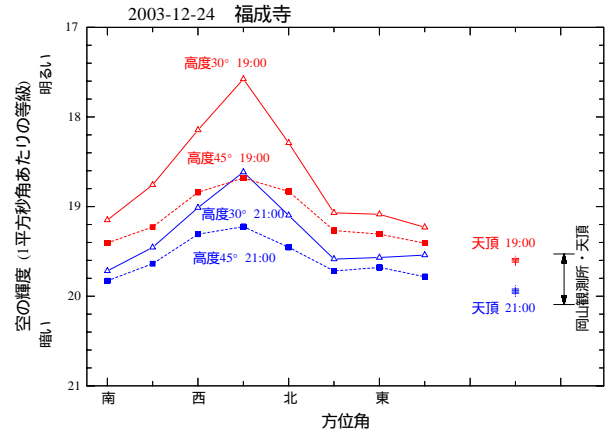
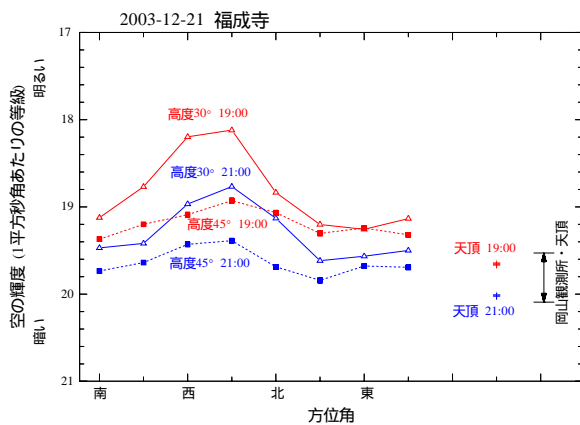


図 4.4a 12月21日 (快晴、月齢27日)

図 4.4b 12月24日 (快晴、月齢1日)

快晴夜の Rバンドにおける夜空輝度の方位角分布。高度 30 度、45 度、90 度 (天頂) の測定結果が示してある。縦軸について、1 等級の違いは、リニアスケールの輝度で約 2.5 倍の違いに対応する。19:00 と 21:00 とで明るさに大きな時間変化がみられるが、これは市民活動の影響によるものである。比較のため岡山観測所における天頂輝度もパネルの右端に示してある。

次に天頂の結果に絞って議論する。図 4.5 に、天頂における夜空輝度の時間変化を示す。快晴夜にみられる時刻と共に暗くなる傾向は、薄曇りの 12 月 25 日はみられなかった。これには薄雲の光学的厚さの時間変化の影響も含まれているだろう。総じて、福成寺の天頂における夜空輝度は、月明かりの無い快晴夜で 20.0 等程度であり、薄曇りの日にはそれよりも 1 等ほど明るくなるという結果が得られた。

その瀬戸内沿岸から約 7.5 km にある標高 500m 前後の丘陵地に位置する。この丘陵地は、瀬戸内沿岸と西条盆地との分水嶺に対応する。このことから、福成寺の気象は、瀬戸内沿岸と西条盆地の中間的なものになることが予想される。ここではまず、この地方の大局的な気象に対する福成寺の気象の位置づけについて考察したい。洞山と福成寺とは距離にして 1.1 km、高度で 60m しか違ってしかいないのでほぼ同じ気象状態と考えてよからう。

洞山の測定によると、1982 年 5 月 16 日から 1983 年 5 月 15 日までの年間降水量は 1350.0mm である。一方、福成寺に近い 2 つのアメダス測定地点は、東広島（西条盆地西側）と竹原（瀬戸内沿岸）であるが、両地点における同時期の降水量は、東広島が 1523.5mm、竹原が 1136.0mm となっている（但し洞山の測定期間に合わせるため、1982、1983 両年の 5 月のデータは平均して用いた）。つまり、洞山の雨量は、東広島と竹原の中間的な値となっている。

洞山は位置的にも東広島と竹原のアメダス測定点の中間に位置しているが、降水量が中間になることは、気象の傾向も両者の中間の値をとることが期待される。山陽地方においては年間日照時間や降水量は瀬戸内沿岸からの距離でほぼ決まっていると言ってよく（図 4.6）洞山や福成寺の気象が、瀬戸内沿岸の竹原と、西条盆地西部に位置する東広島の、それぞれのアメダスポイントの中間的な傾向を示すと考えるのは、リーズナブルであろう。

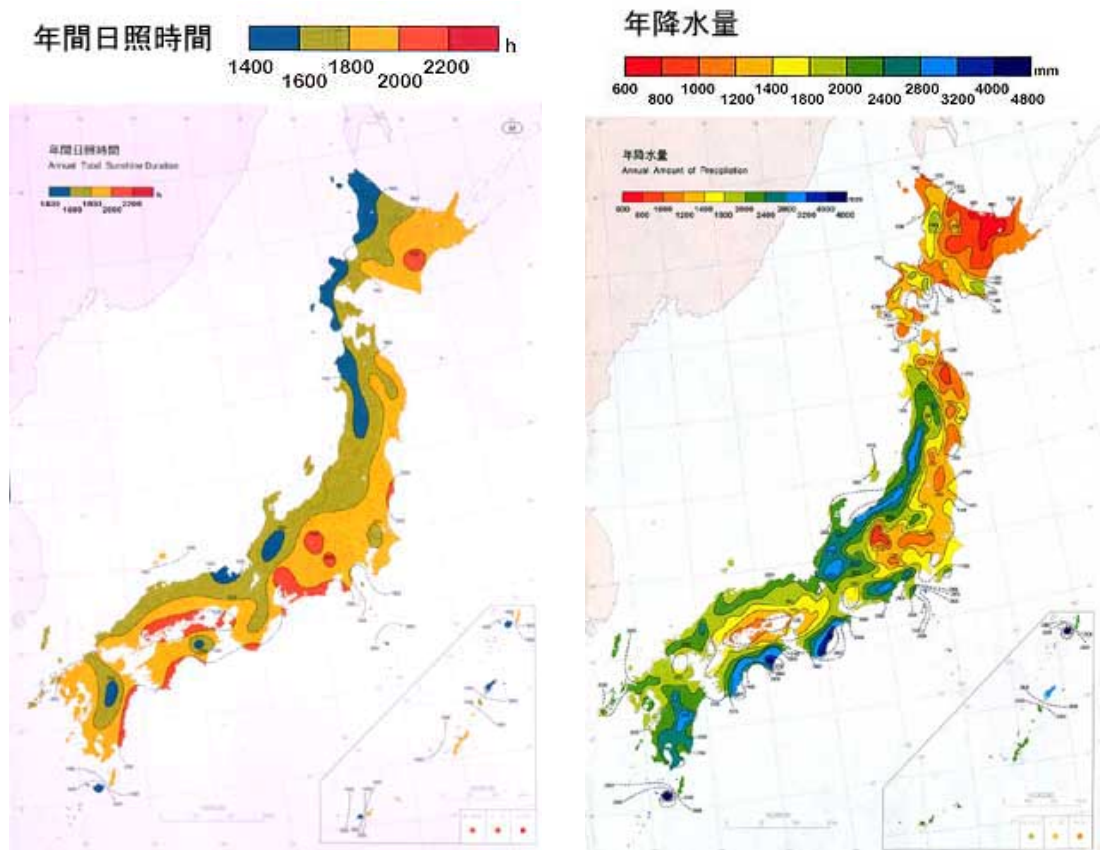


図 4.6 年間日照時間と年間降水量の分布図（日本気候図 1990 年度版，気象庁刊より抜粋） [16]

4.4.2 日照時間に関する東広島・竹原地方と笠岡・倉敷地方の比較

光学観測において最も重要である気象パラメーターの一つは、夜間の晴天率である。しかし、福成寺における過去の夜間晴天率の資料は殆ど無い。ここでは、夜間の晴天率に直接関係があると思われる日照時間で比較を行う。なお夜間の晴天率に関係があると思われる別パラメーターである湿度変化（夜霧、朝霧の類）については現地気象調査の項で述べる。気象衛星による赤外線画像解析については、前述の理由で信頼性に問題があると判断し見送った。

日照時間が計測されているアメダス測定地点のうち、福成寺に至近の 2 箇所は前述の東広島と

竹原であり、岡山観測所に至近の2箇所は笠岡と倉敷である。これらの位置関係について、表 4.2 にまとめる。

表 4.2 福成寺および岡山観測所の参考にしたアメダス地点

対象地名	至近アメダス地点	対象地からの地理的位置	コメント
福成寺	東広島	西北西 9 km	標高 224 m、西条盆地西部
	竹原	東南東 21 km	標高 5 m、瀬戸内沿岸
岡山天体物理観測所	笠岡	南西 11 km	標高 0 m、瀬戸内沿岸
	倉敷	東 19 km	標高 3 m、岡山 / 倉敷平野

これら 4 箇所の過去 10 年間の日照時間をグラフにしたものが図 4.7 である。東広島と竹原とを比べると、瀬戸内沿岸にある竹原の方が東広島に比べて年間 150-200 時間ほど日照時間が多いことがわかり、福成寺はこの中間値をとることが期待される。一方、笠岡と倉敷はともに瀬戸内ないしはそれに面する平野部にあり、100-200 時間ほど笠岡の方が長い年もあるものの、ここ数年はほぼ同じ日照時間となっていることがわかる。ここ数年だけで比べると、笠岡・倉敷地方よりも、東広島・竹原地方の方がやや日照時間が多く推移しているものの、全体としては明確な差はみられず、福成寺と岡山観測所の大局的な日照時間は同程度と考えて良いであろう。

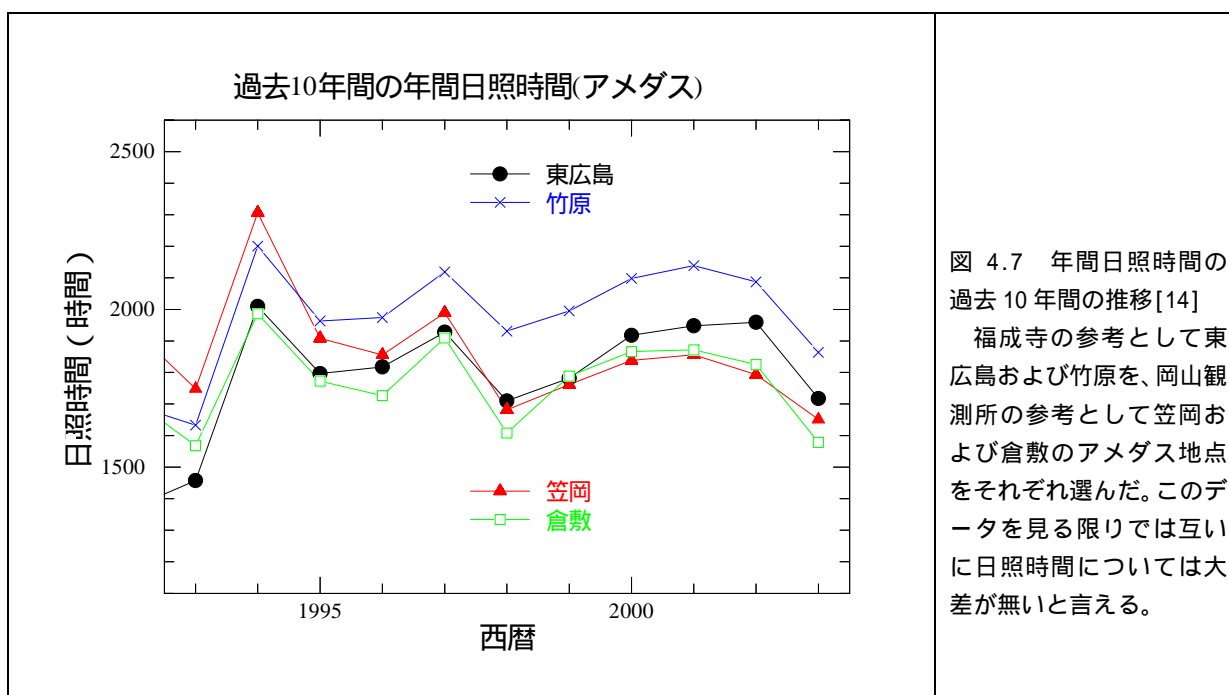


図 4.7 年間日照時間の過去 10 年間の推移 [14]
福成寺の参考として東広島および竹原を、岡山観測所の参考として笠岡および倉敷のアメダス地点をそれぞれ選んだ。このデータを見る限りでは互いに日照時間については大差が無いと言える。

4.4.3 福成寺周辺候補地のローカルな気象

大局的な傾向として福成寺と岡山観測所との日照時間は同程度であるようである。一方、気象庁データベースからは、福成寺周辺の丘陵地帯におけるローカルな気象の傾向を探ることは困難である。洞山については過去に 1 年間の測定データを入手できたが [15]、一ヶ月ないしは季節ごとに平均化されるなど、整理されたデータになっており、気象変動の細かい特徴を知ることは難しい。そこで、独自に気象センサーを設置して、福成寺周辺のローカルな気象特性を把握することにした。

測定に用いた器具は、岡山観測所での気象モニターに用いられているものと同類の「ウェザーステーション ヴァンテージ・プロ」(米国デービス社製、日本代理店 株 AOR) 1 機と、携帯可搬型の「エコログ」(中村理工工業株式会社製) 7 機である (図 4.8)。ヴァンテージ・プロは気温、

相対湿度、気圧、風速、風向、日射量、雨量を測定できるが、一定の電力を消費するため、電気を確保できる場所に置く必要がある（太陽電池モデルもあるが、視界が開けた場所でなくてはならない）ため、我々は地域の了解を得て、福成寺近隣の集会所の屋上にセンサーを設置することにした。データは接続する PC に、10 分間に一度記録される設定とした。一方、エコログについては、電池式の携帯型で、気温、相対湿度、気圧、光量、騒音を測定でき、30 分に 1 度の設定なら 1 ヶ月にわたり記憶できるため、インフラの無い候補地にも設置できる。我々は土地所有者の了解を得て、福成寺周辺の候補地など 6 箇所にエコログを設置した（図 4.9）。気温と相対湿度の測定精度は、それぞれのマニュアルによると、ヴァンテージ・プロ / エコログの順で、 $\pm 0.5 / \pm 1$ 、 $\pm 3\%$ (90%以上なら $\pm 4\%$) / $\pm 5\%$ (60%以下) となっている（参考までに、同環境下で試験した際の 7 台のエコログの気温および湿度のばらつきは、peak-to-peak で 0.7、5%であった）。これらの気象データは、ヴァンテージ・プロが 2004 年 4 月 28 日から、エコログが同 5 月 14 日より継続して得られており、1、2 週間おきに現地をまわって回収している。



図 4.8 集会所屋上に設置されたヴァンテージ・プロの屋外センサー（左）と、候補地の山中に設置されたエコログ（右；雨よけのカバーの中に据えてある）



図 4.9 気象センサーの設置場所

ヴァンテージ・プロ（据付型）
集会所屋上（地上高～5m）

エコログ（電池式携帯型）：
集会所軒下
九品堂脇
第 2 候補地
第 1 候補地
第 3 候補地
福成寺車庫脇

これらのセンサーにより得た気象データを解析する前に、福成寺周辺の大まかな傾向を把握しておきたい。洞山における湿度と気温の日変化について[15]、季節ごとの平均をプロットしたものを図 4.10 に載せる。比較のため、岡山観測所における季節平均(2002-2003 年)についても、データベースから取り寄せたもの[17]をプロットしておいた。これを見ると、洞山において夏季、秋季、冬季と洞山における夜間の湿度が 80%台後半に達していることがわかる。光学観測において高湿度状態では、主鏡面が結露して反射率や結像性能が格段に落ちてしまうため観測が行えない。また結露すると、アルミ蒸着面の劣化が激しい。岡山観測所では、ビジターズガイドにおい

て、外気の湿度が 95%を超える場合（又は主鏡付近の湿度が 90%を超える場合）にはドームを閉じて観測を中止させている。このことから夜間の湿度が高く推移することは注意する必要がある。ただし、この洞山の結果は必ずしも悲観的なものではない。つまり、これは曇りや雨の日も含んだ平均であって、そもそも観測が不可能な日（で且つ湿度が高いと期待される日）も含まれていること、およびこの年は冷夏で特に7月や9月の雨量が多かったことから平均湿度も高めであったと推定されること、および（平均値+標準偏差）が相対値としての限界である100%近くまで達していることは（平均値-標準偏差）を大きく下回る日も多数存在することを指している、などが理由である。ただしこのままでは楽観は出来ないので、以下では湿度変化には多少注意することにして、福成寺周辺で得られたデータを見て行くことにする。

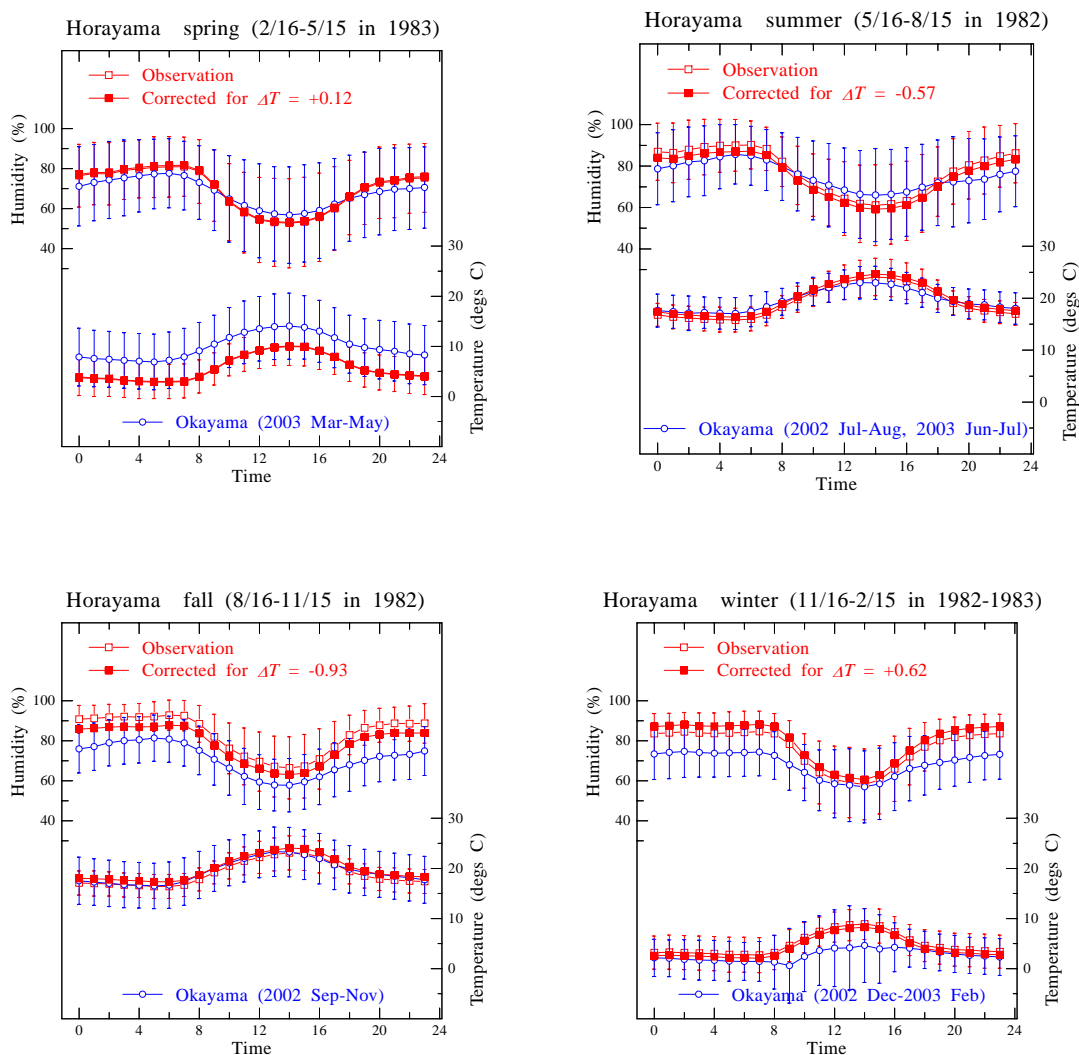


図 4.10 1982-1983 年の洞山における湿度と気温の日変化の季節平均。上段が左から春季(2/16-5/15)、夏季(5/16-8/15)、下段が左から秋季(8/16-11/15)、冬季(11/16-2/15)のもの。比較のため、岡山観測所における 2002 年の季節平均を青でプロットしてある。誤差棒は標準偏差である。湿度については、各季節の呉と福山の気温の平年値との偏差（1982 年夏季から 1983 年春季まで順に、 -0.57 、 -0.93 、 $+0.62$ 、 $+0.12$ ）を考慮し、シャルルの法則及び Sonntag の飽和水蒸気圧の式を用いて、「湿度の平年値」を換算し、塗り赤四角で示した。これを見ると、夏季、秋季、冬季と夜間の湿度が平均的に 80%台後半と高い値で推移している。ただし、これは雨の日も含む単純平均値であること、1982 年夏季は冷夏で雨も多かったこと、特に 7 月や 9 月は停滞前線や台風の影響が大きかったこと [15]、（平均値+標準偏差）が最大値である 100%近くまで達していることは、（平均値-標準偏差）を大きく下回る日も多数存在することを指している、などに注意する必要がある。

まず、設置したセンサーにより得た気象データの典型例を見よう。図 4.11 と 4.12 に、6 月上旬に福成寺周辺で得られた気象データの時間変化を示す。比較のため、岡山観測所（188cm 鏡ドーム脇）および洞山の季節平均データと比較したのも載せてある。

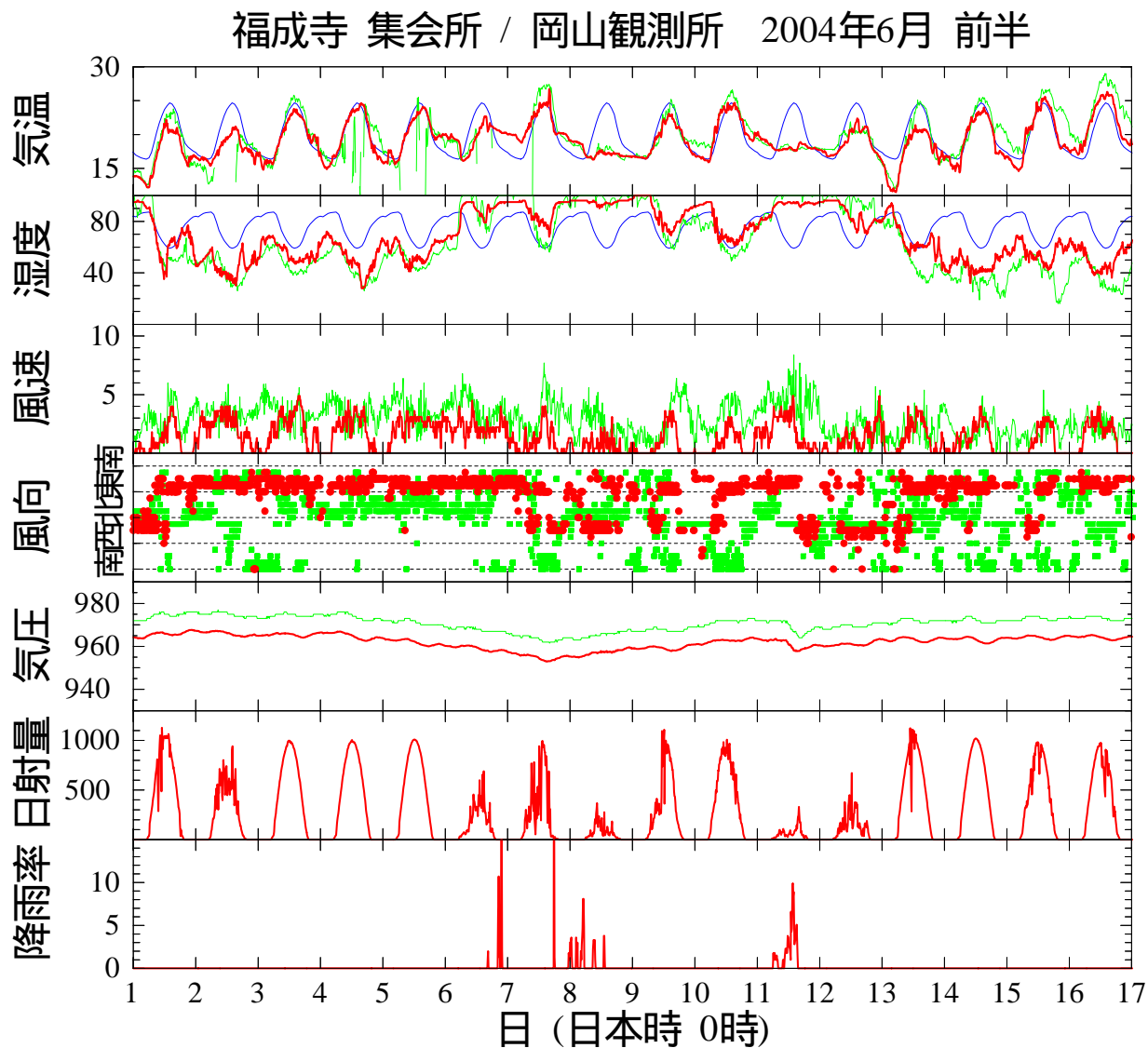


図 4.11 福成寺集会所で得られた 10 分おきの気象データの例。上から順に温度 ()、相対湿度 (%)、風速 (m sec^{-1})、風向、気圧 (hPa)、日射量 (W mm^{-1})、降雨率 (mm hr^{-1}) で、6 月 1 日から 16 日までの時間変化をプロットしてある。集会所のものは赤線又は赤点で示してあり、緑色は岡山観測所の 188cm 鏡ドーム脇のデータ (1 分おきに記録されたものを間引いて 10 分おきにした。気温については一部欠損がある) で、青線は 1982 年の洞山における一日の気温・湿度推移の夏季平均 (5 月 16 日-8 月 15 日) である。

2004年6月 福成寺周辺候補地

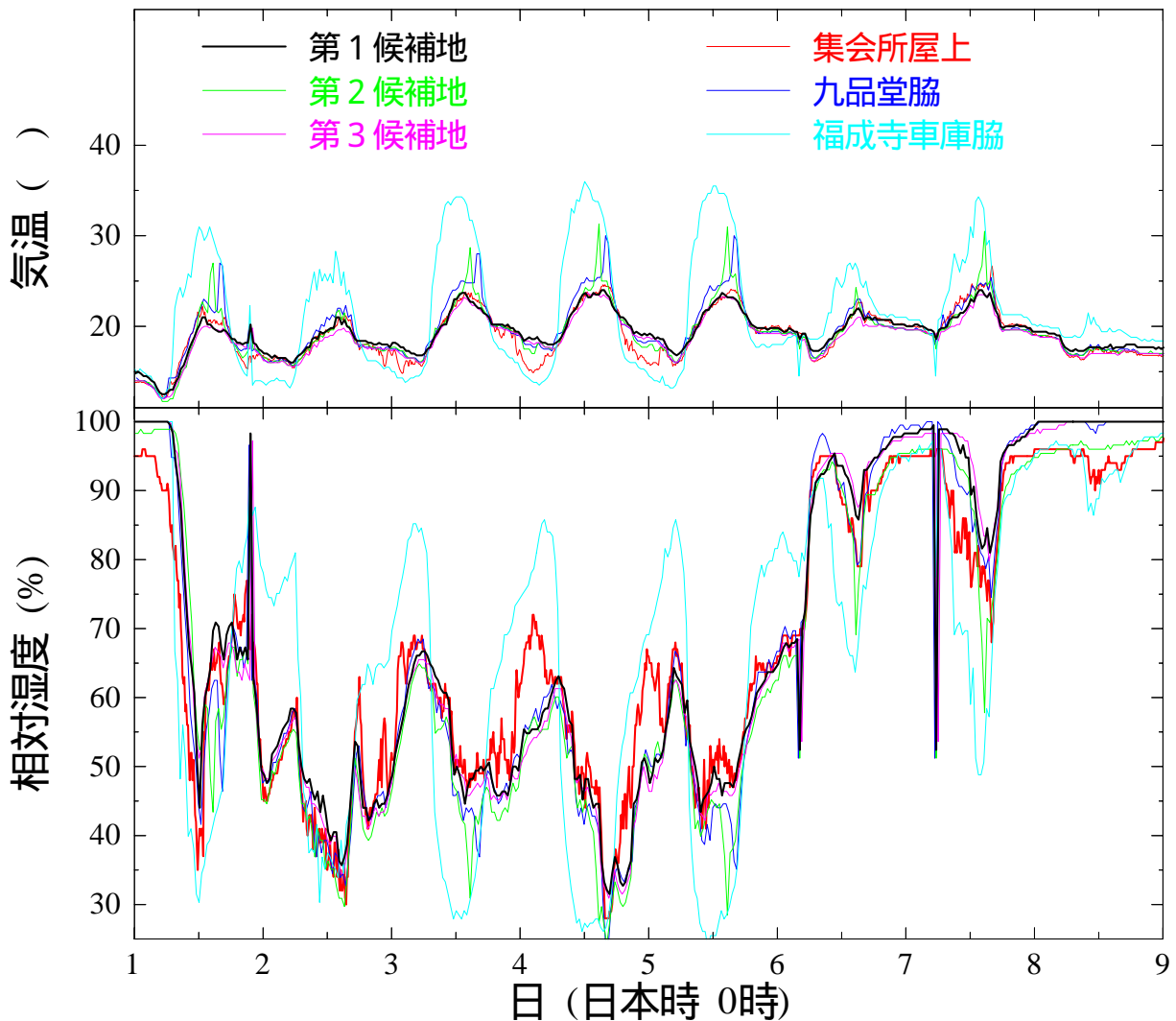


図 4.12 福成寺周辺の各候補地（第 5 節参照）参考地、および集会所で得られた気温と相対湿度の例。第二候補地や九品堂脇で見られる昼間のピーキーな変動は、センサーに直射日光が当たったための変化で多くは有意なデータでは無いことに注意する必要があるが、1 日夜や 6 日朝、7 日朝の急激な変動は各候補地に共通しており、リアルと見てよいであろう。この図は一例であるが、候補地（ピーク）と集会所との違いや、候補地と近隣の窪地（車庫脇）での違いがよくわかる。

図 4.11 において、日射量がきれいな山形の推移をしている日は、福成寺周辺は快晴と考えてよく、山形がくずれている日は晴れ（薄雲を含む）又は曇りと考えてよい。降雨があった日は降雨率のグラフから判別できる。この図を見ると、(1)気温と湿度について、福成寺と岡山観測所はだいたい似た推移をしているが、(2)夜間の湿度は福成寺が高めであることが多い、(3)夜間の風速について岡山では昼と変わらず毎秒 2-3m の風が吹いているのに対して、(4)福成寺は風が殆ど止むことが多い、(5)福成寺の風向は西北西ないしは東南東に二元化している、などの特徴が見られる。(2)(4)は良く相関しており、風が止んで気温が下がり、湿度が上がる傾向は福成寺においてよくみられる。これについては後にまた議論する。

図 4.12 には、集会所のほか、候補地のピークを含む数箇所の気温と湿度の変化をプロットしてある。候補地と集会所での気温や湿度の推移はよく似てはいるが、よくみると、集会所において 4 日の 0 時過ぎや 5 日の 0 時前後には、候補地に比べて気温が下がり、湿度が上昇しているこ

とがわかる。この時は集会所において風が止んでいることから（図 4.11）、夜間の湿度や気温の変化には風の影響が大きいことが、このグラフからもわかる。また、窪地である福成寺車庫脇では、昼間は日射の影響もあって気温が上がり湿度も下がるが、夜間には冷え込み、湿度も高くなっている。ここは最良のシーイングを記録した場所でもあり、風が遮られることが原因でこのような変化を示すと考えられる。

以下では、福成寺周辺において得られた気象データについて、項目別に議論する。

A) 湿度変化

2004年4月28日から7月17日までの集会所における温度、湿度、風速の平均日変化を図 4.13 に示す。この図では、1mm 以上の降雨があった日を除いたものと、すべての日のそれぞれ平均を示している。雨の日も含んだ平均において岡山観測所と比べると、明け方の湿度で 10%ほど高いようであるが、晴れた日の明け方の湿度は 80%を多少超える程度で観測に影響するほどではない。なお、福成寺においては、気温や湿度の日変化と、風速の日変化はよく相関している。

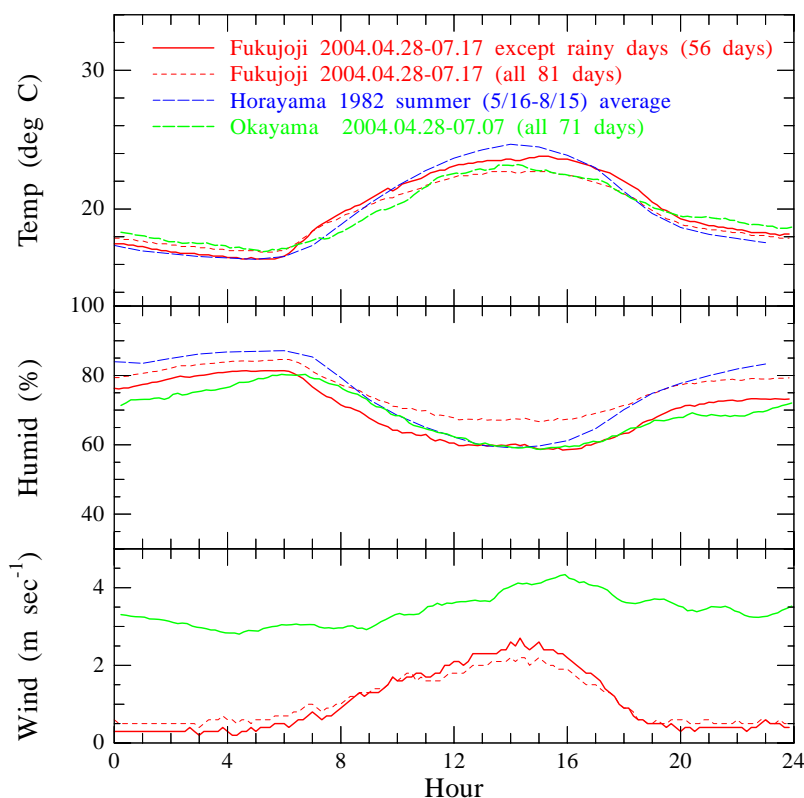


図 4.13 福成寺集会所における気温、相対湿度、風速の 2004 年 4 月 28 日 - 7 月 17 日の平均日変化（10 分間隔）。赤実線が 1mm 以上の降雨があった日を除いた平均（全 56 日）、赤破線がすべての日の平均（全 81 日）で、青破線が 1982 年夏季の洞山のすべての日の平均値（1 時間間隔）。緑実線は同時期の岡山観測所における全平均。福成寺と岡山との風速の違いが顕著である。

B) 夜間の風速

図 4.13 からわかるように、福成寺の風速は岡山観測所に比べて平均的に小さく、特に夜間の風速が小さい。これは福成寺の一般的な傾向で、多くの晴夜の夜中には風速がゼロとなっている（図 4.11）。候補地（ピーク）における風速は、周辺の木を伐採しないと正確な測定は出来ないため未測定であるが、移設地確定後は、ドーム施設の設計にも関係するため、なるべく早く測定する必要がある。なお、洞山においては、年間平均で夜間も 4m 前後の風速が測定されている。福成寺周辺において風速が小さいことには、地形的な環境が影響している可能性もある（表 4.3）。

表 4.3 1982-1983 年期の洞山における時刻別風速・風向の年間平均

時刻	平均風速	最多風向	時刻	平均風速	最多風向	時刻	平均風速	最多風向
0 1 時	4.1m/秒	W	0 9 時	3.4m/秒	E	1 7 時	3.7m/秒	SSE
0 2 時	4.1m/秒	W	1 0 時	3.5m/秒	E	1 8 時	3.9m/秒	SSE
0 3 時	4.0m/秒	E	1 1 時	3.6m/秒	SE	1 9 時	3.9m/秒	W
0 4 時	4.0m/秒	E	1 2 時	3.8m/秒	SE	2 0 時	4.0m/秒	W
0 5 時	4.1m/秒	E	1 3 時	3.9m/秒	SE	2 1 時	4.1m/秒	E
0 6 時	3.9m/秒	E	1 4 時	3.8m/秒	SE	2 2 時	4.1m/秒	W
0 7 時	3.8m/秒	E	1 5 時	3.8m/秒	SE	2 3 時	4.1m/秒	W
0 8 時	3.5m/秒	E	1 6 時	3.9m/秒	SSE	2 4 時	4.1m/秒	E

C) 湿度変化および気温変化と、風速との相関

先にも述べたように、福成寺周辺における湿度と気温の変化と風速には、良い相関がある。2004 年 5 月と 6 月の晴天期の気温、湿度、風速の時間変化の例を図 4.14, 4.15 に示す。これを見ると、福成寺集会所においては、深夜に風が止み、気温が下がり、湿度が上がる傾向が明確である。この傾向は、風がある岡山観測所をはじめ、福成寺周辺の高地(候補地)でも特に見られない。つまり、福成寺下の鞍部に特徴的な傾向と言えよう。

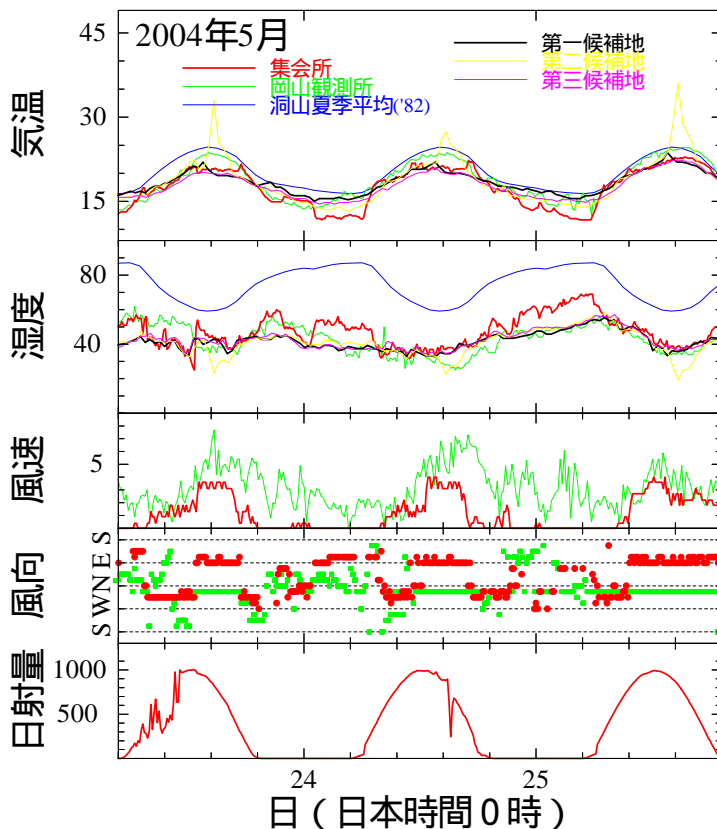


図 4.14 2004 年 5 月 23 日から 25 日にかけての晴天期の福成寺周辺の気象変化。24 日 0 時前後、25 日 0 時前後には集会所における風速がゼロの時間帯があるが、その時間帯には気温が下がり、湿度が高くなっていることがわかる。候補地となっている高地(ピーク)や風がある岡山観測所ではその傾向はみられない。23 日昼の湿度上昇は、東寄りの湿った風が吹いたためであろう。

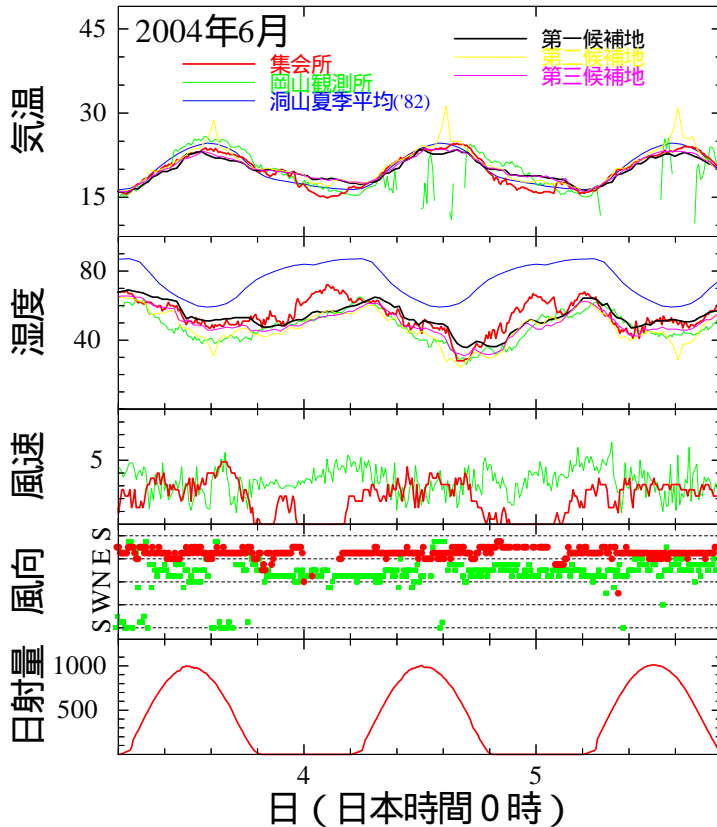


図 4.15 2004 年 6 月 3 日から 5 日にかけての晴天期の福成寺周辺の気象変化。4 日 0 時過ぎや 5 日 0 時前後には集会所における風速がゼロになっているが、その時間帯には気温が下がり、湿度が高くなっていることがわかる。図 4.14 と同じ傾向である。

D) 高地（候補地）と集会所（低地・鞍部）との差異

福成寺周辺の高地（候補地～標高 500 m）と、集会所をはじめとする低地（鞍部～標高 450 m）の違いをみってみる。C)で触れたように、晴夜においては、低地に比べて高地では夜間の湿度変化が少なく、岡山観測所とほぼ同様の気温・湿度変化を示すことがわかる。これは、福成寺周辺においても、高地においては低地に比べてやや風があることを指しているのかもしれない。高地における風の測定は伐採を待つ必要があるが、いずれにせよ、風通しが良くなることで、湿度がこれまでの測定よりも下がる傾向にあると考えられる。一方、高地（候補地）どうしで比べると、気温や湿度の差異は比較的少ない。すなわち、候補地としている標高 500 m 前後のピークはいずれも、同じような気象変化を示している。

E) 高地（候補地）のみの一時的な湿度変化

図 4.12 を見て頂きたい。6 月 1 日の夜 22:00 前後の 30 分にわたり、集会所を除く各地点において気温が一時的に 30%も上昇し、湿度が 90-100%に達したことがわかる。これは、ピーク周辺に一時的に霧がかかったためかもしれない。このような高地のみの（且つ、高地にいずれも共通した）30 分程度急激な湿度変化については、降雨当日又は翌日に限りみられる現象である。前日の 5 月 31 日は一日中降雨があったし、もう一つのイベントである 5 月 18 日（夜 20:30 頃）の前日にも降雨があった。エコログを設置した 5 月 14 日以降で、集会所において 1mm 以上の降雨があった日は 20 日あるが、このような湿度の急上昇は都合 2 回見られたことになる。（湿度上昇幅が 15%以下と小さい上昇も含めると、雨天当日の 5 月 17 日夜 19:00 頃、同じく雨天当日の 7 月 10 日朝 7:30 頃と翌 7 月 11 日朝 9:30 頃にも似た変化が見られる）。この 30 分程度の変動がどういうメカニズムで起こるのかに

ついて、一帯の地表は水分を多く含んでおり、風が止んで地表面の湿度が非常に高くなった状態で一陣の風が吹いた可能性もあると考えているが、風については候補地から下った集会所でしか測定しておらず、明らかな傾向は今のところ見られていない。いずれにしろ注意する必要があるだろう。また、もう一つコメントしておきたいのは、6月1日22:00頃の変化と全く逆の変化が、6月7日の朝5:40頃に見られることである。この日の前の晩に降雨があり、湿度が100%近くで推移していたが、30分程度の間だけ、温度が1ほど下がって湿度も40%以上下がっている。これら一過性の現象がこういったメカニズムで起こるのは気になることであり、前者は湿度が上がることから特に注意する必要があるが、いずれも持続時間は短く、観測を大きく妨げるものではないと考えられる。

F) 卓越風

福成寺集会所における測定では、風向は明らかに、東南東、又は西北西に二元化している。これは、集会所周辺の地形（鞍部の形状）の影響もあるであろう。1982-1983年期の洞山においての卓越風は、東ないしは西となっている（表4.3）。地図を見ると、洞山周辺で東西方向にゆるやかな谷が伸びており、その影響もあるかもしれない。総合すると、福成寺周辺における卓越風は、だいたい東ないしは西の二元化しているようであるが、周辺の地形が影響している可能性もあるので、より正確には候補地において周囲を伐採して測定を行う必要があるだろう。

センサーを設置して測定したことで、福成寺周辺の気象状況がかなりよくわかってきた。気象庁データベースによる全般的な傾向として、岡山観測所と同程度の晴天が期待されることは既に述べたとおりであるが、福成寺周辺において夜間には風が極端に弱まって、温度が下がり湿度が上昇する傾向があること、ただし一定の風が通っていると思われる各ピーク（候補地）における湿度上昇は比較的少なく、岡山観測所と同程度で推移していることなどが明らかになりつつある。雨天直後の高地のみの急な気温・湿度変化の原因は不明であり、今後の調査を必要とするが、頻度が少ないこと、いずれも持続時間が30分程度と短くすぐに回復することから、観測上大きな支障とはならないであろう。

以上のことから、気象条件について、福成寺周辺は岡山観測所と同程度の気象環境を保持しており、現時点において、望遠鏡の立地に支障が無いと判断する。

5 福成寺周辺における土地調査と移設場所の選定

福成寺周辺が、岡山観測所と並び、科学的観測環境に優れた場所であることがわかった。この節では、具体的な候補地を掲げて土地調査を行った結果について述べる。

5.1 周辺地域の道路建設および土地造成に関わる諸条件

まず、福成寺から洞山にかけての地域について、保安林に指定されている集会所南側の地域を除き、特徴的な3箇所の候補地（旧第一～旧第三候補地）を選定した（図5.1）。そして、東広島市の全面的な協力を得て、関わる法令や取り付け道路の整備について調査を行った。東広島市では関係10課（企画課、文化課、生涯学習課、農林課、農村整備課、建設課、都市計画課、都市整備課、建築指導課、用地課）からなるプロジェクトチームが発足して、用地準備について具体的な検討を行っている。旧第一～第三候補地それぞれの設置計画について課題をとりまとめたものを表5.1に示す。

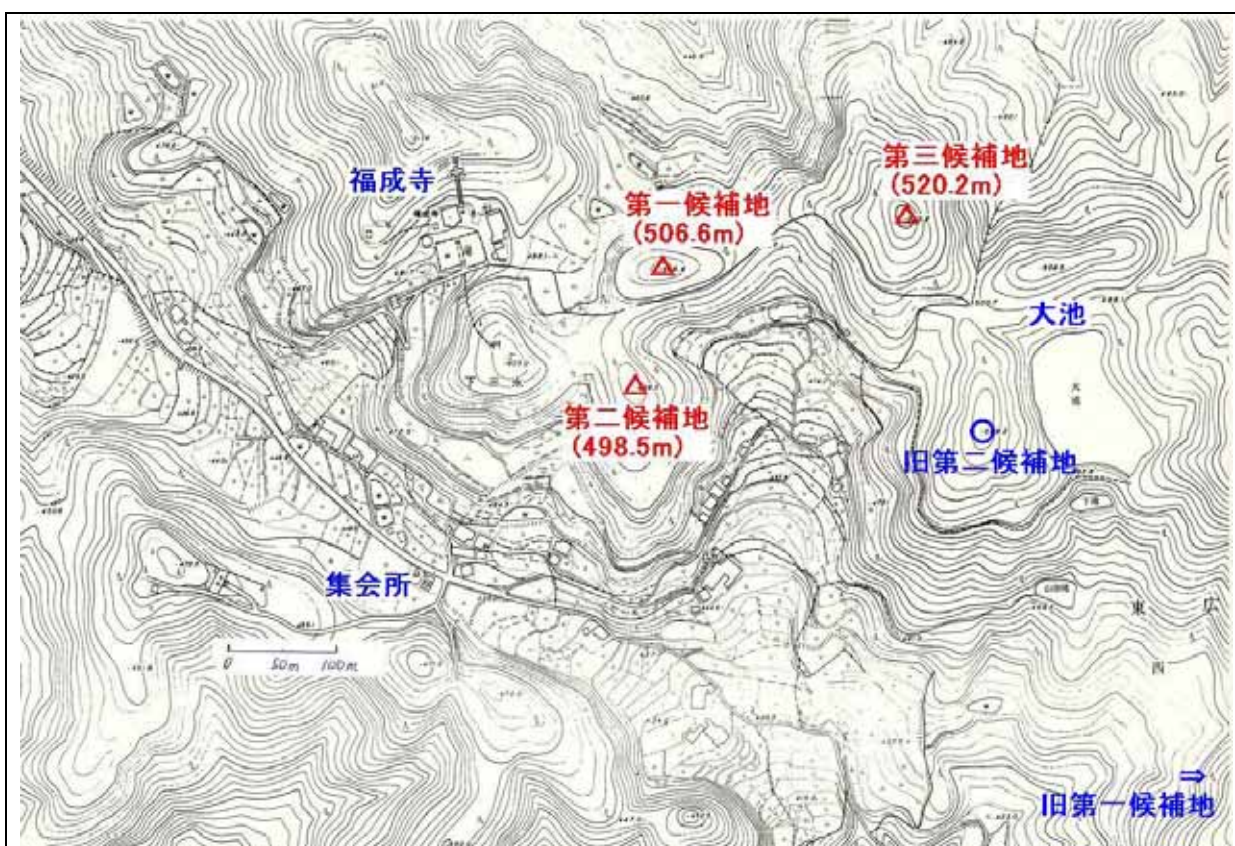


図5.1 候補地の場所。旧候補地は市が設置計画について課題をとりまとめるため、特徴的な三箇所を選んだもの。現在は、シーイング調査の結果も勘案して、赤字で示した第一～第三候補地を挙げている。旧第三候補地は、現在の第二候補地と一致する。旧第一候補地の位置については図4.3を参照のこと。

表5.1 旧候補地の設置計画に関する検討課題

	旧第一候補地	旧第二候補地	旧第三候補地 (=現 第二候補地)
アクセス道整備について (金額は用地費を除く)	工事2年、測量設計6ヶ月 用地測量・取得6ヶ月 全長1200m、3億円以上	工事1.5年、測量設計6ヶ月 全長650m、2億円以上	工事6ヶ月、測量設計2ヶ月 全長300m、1億円未満
	幅員5m以上の場合地方特定道路整備事業の補助導入が可能となる。		

	用地取得の方法（寄付・買収）、買収の場合事業の位置づけの決定が必要（一般道路改良では寄付が原則）。		
	道路面積が 1000m ² (林地)に達する場合林地開発の手続きが必要。最後の約 300mは受益地が無い場合農道整備困難	小規模農地を通過するため工事単価が高くなる。採択基準（受益戸数 2 戸以上、受益面積 0.5ha 以上）に達しないので農道整備は困難	文化財の可能性。採択基準に達しないので農道整備は困難
文化財について	試掘調査の確認要	試掘調査の確認要	試掘調査の確認要 遺跡が存在する可能性大
	アクセス道についても遺跡有無の確認が必要。棚田等周辺の景観保護の在り方の検討。遺跡が存在する場所で計画された場合、文化財保護法第 57 条の 2 により、文化庁長官宛てに「埋蔵文化財の発掘について(届出)」を工事着手 60 日前までに提出しなければならない。そして遺跡に影響があると判断された場合、発掘調査が必要となる。その後、発掘調査を実施する機関は、文化庁長官宛てに届出を調査着手 30 日前までに提出する必要がある。		
用地について	国有林（保安林）の解除に 1 年弱必要。森林法の範囲に入らなければ（1ha 未満）伐採届のみであり工事着手直前でも可能。但し道路区域が 1ha 以上となれば連絡調整。要国有林は現時点では独立行政法人に移管（貸借・売却）困難。		
開発等の制限について	市街化調整区域・宅地造成工事規制区域である。造成工事について都市計画法第 29 条の許可及び宅地造成等規制法第 8 条の許可が、建築物については建築基準法第 6 条にかかる建築確認がそれぞれ必要である。（広島県開発審査会は例年 2～5 回開催されており、許可に際してスケジュール調整する必要がある） 農地が存在していないが、道路のアクセスに関しての農地開発については公共事業の場合は手続き不要である（面積確定後、農林振興課へ連絡要）。中山間地域等直接支払制度の対象地域であるため事前調整を要する。道路等への変更により、過去に遡って交付金の返還が必要となる。21 円/m ² 。 造成面積が 1ha を超えれば森林法の林地開発許可手続き（約 7 ヶ月）が必要。未満であれば森林法による伐採届で済む（市へ提出）。 周辺に芝生を張る（地形・地質変更）のなら造成面積に含めるよう指導あり。 アクセス道路が不十分な施設（取り付け道路）であると判断されると、道路も含めた面積で申請を求められる（森林法）。		

1.5 m 望遠鏡との密接な連携を予定しているガンマ線衛星 GLAST は 2007 年 2 月に打ち上げられる予定になっており、準備期間も含めると、2006 年度ははじめの定常観測開始は是非とも確保しなくてはならない。そのためには、2005 年春には取り付け道路の工事を終了して、ドーム施設の着工に移る必要がある。その結果、旧候補地の中では第三候補地（現 第二候補地）のみが条件を満たすことになる。そこで、旧第三候補地周辺のピークから、図 5.1 のように第一～第三候補地を選定し直した。これとほぼ並行して周辺でのシーイング調査が行われているが、これらの地域ではだいたいどの場所でも良いシーイング環境にあることが判っている。

5.2 第一候補地における試掘調査

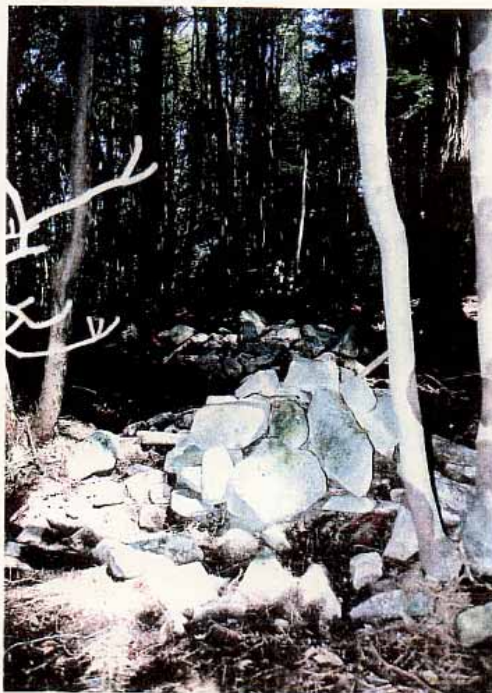
福成寺周辺第一候補地において、東広島市による試掘調査が行われ、6 月 16 日付けで調査結果が報告された。それによると、図 5.2, 5.3 のとおり、第一候補地の西側約 3 分の 1 程度の範囲で、福成

寺旧境内遺跡（中世の古墓群）の存在が確認された。一方、ピーク中心を含む東側では、遺跡は確認されなかった。遺跡を外した残りの領域だけでも、取り付け道路を含むドーム施設を建設するのに十分な用地が確保できる見込みである。遺跡をドーム建設に併せて撤去ないしは移設することについては、今後広島市と協議を進めたいと考えている。

積石塚状遺構



手前左：2号積石、手前右：3号積石、奥：1号積石



1号積石



2号積石

図 5.2a 福成寺周辺第一候補地における文化財試掘調査で確認された遺跡



7T 土坑墓 (火葬墓)



13T 土坑墓



14T 土坑墓



16T 集石遺構 (墓)

図 5.2b 福成寺周辺第一候補地における文化財試掘調査で確認された遺跡

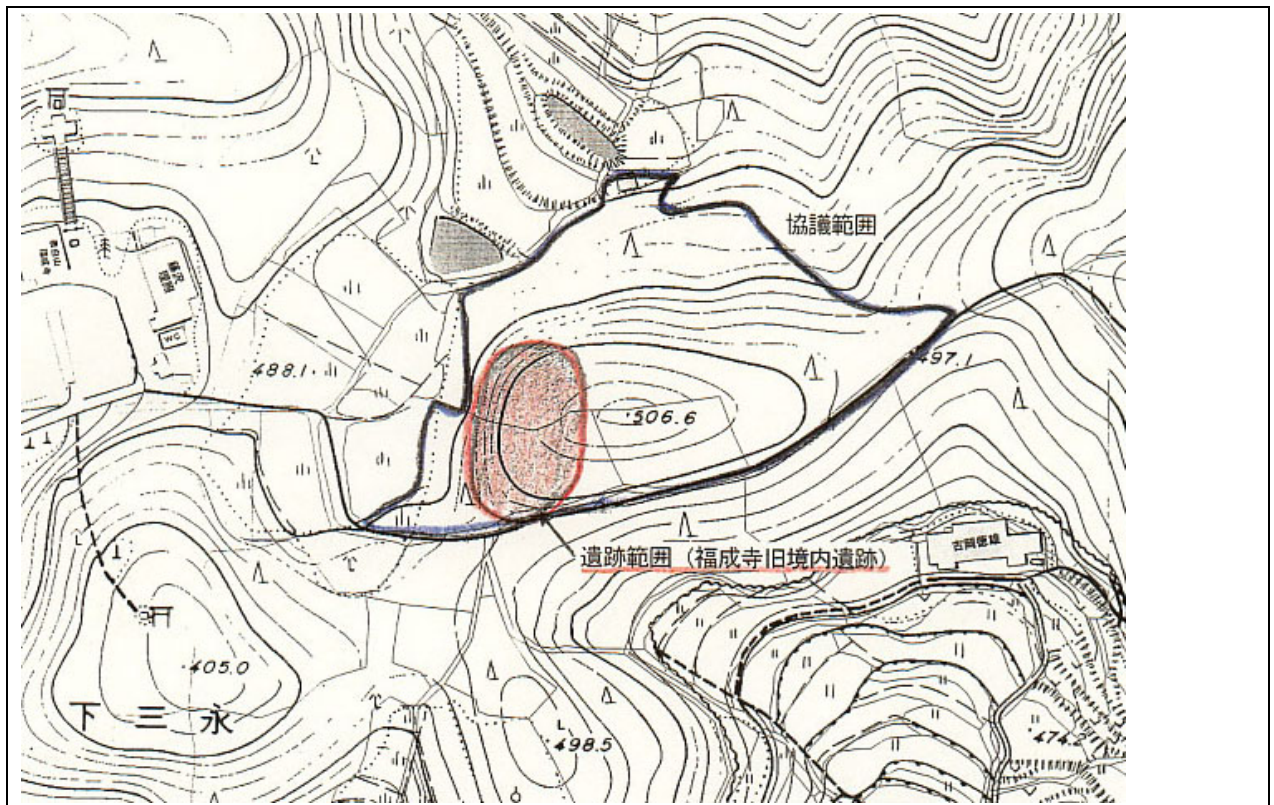


図 5.3 福成寺周辺第一候補の協議範囲のうち、遺跡が確認された範囲

5.3 設備配置案（暫定）

取り付け道路や施設の配置案については、確保できる予算の都合もあるため確定はしていないが、遺跡を避けた暫定案として、図 5.4 のような配置案を考えている。これは標高 506.6m のピークを削って 503m-502.5m の平地を確保し、現ピーク付近に 1.5m 望遠鏡ドーム（直径 9m 以上、不動点高 8m 以上）を据え、南側の低くなった部分に制御棟兼教育棟を構えるものである。ドームを中心に半径 50m 程度の範囲は樹木を伐採し、シーイング環境の確保に努める。ドームと制御棟との向きについては、周辺伐採後の卓越風測定により確定する予定である。取り付け道路については、福成寺の駐車場まで延びている道路を延長する形で、（遺跡を避けて）2つのピークをぐるりと回するような配置案となっている。

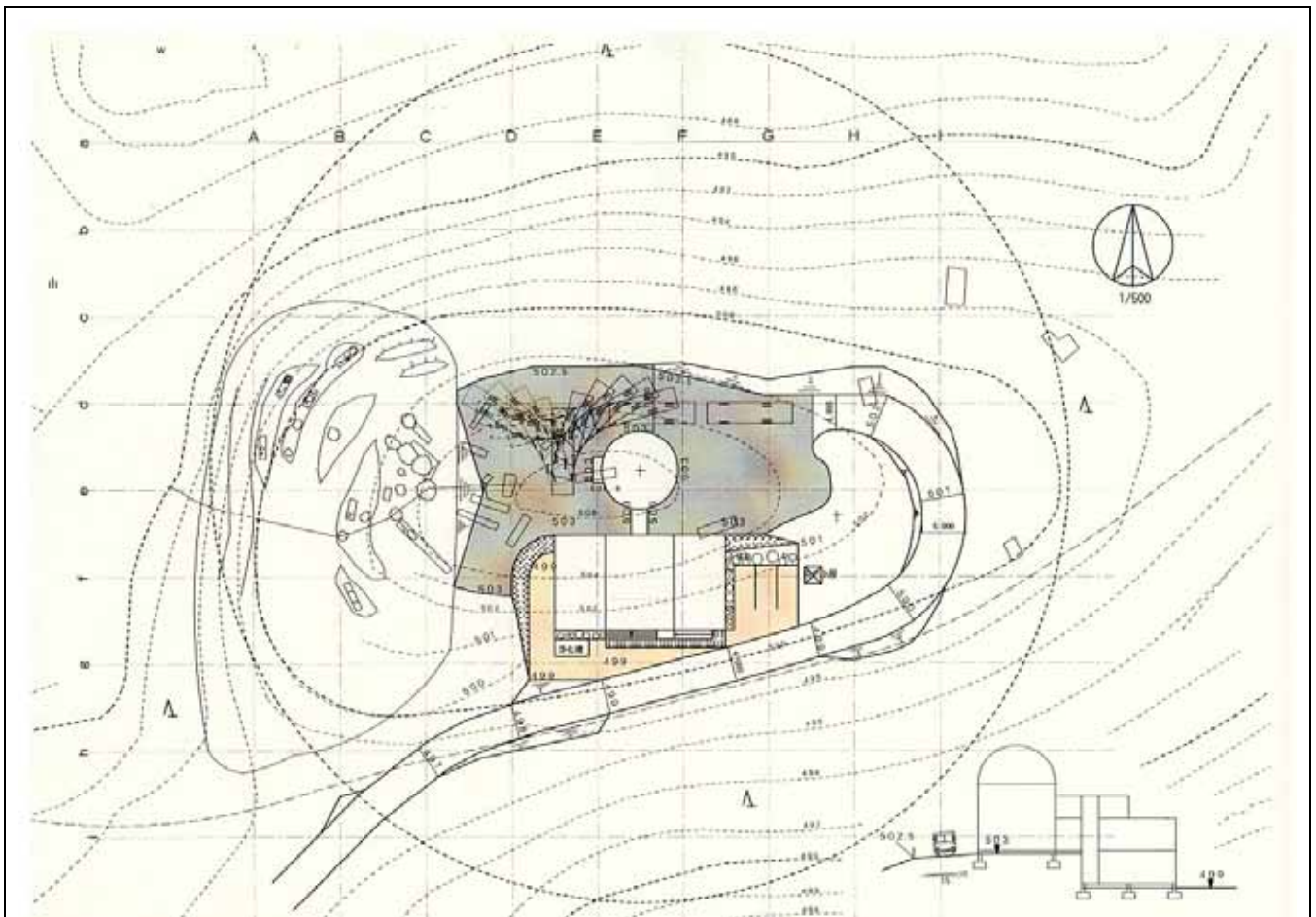


図 5.4a 福成寺周辺第一候補地におけるドーム施設の配置案（暫定）。真ん中が望遠鏡ドームで、南側に制御棟を設ける案である。ドーム周囲を大型バスが展開できる程度に広く舗装し、そこから遺跡を避けて東周りで取り付け道路を設ける。ドームを中心とする円は半径 50m で、この範囲内の樹木は伐採する予定。また図中には等高線が示してある。

6 まとめ

福成寺周辺における科学的環境は、国立天文台岡山天体物理観測所と並び、1.5m 望遠鏡の設置に相応しい場所である。また、埋蔵文化財試掘調査を含む社会的条件の調査の結果、我々が第一候補とする 506.6 m のピークにおけるドーム施設建設の可能性について、具体的な目処が立ったと考えている。以下では、1.5m 望遠鏡を福成寺に置いた場合の具体的な観測限界を評価し、想定する観測研究に十分な性能を持つことを再確認するとともに、現状における年次計画案を紹介して締めくくりとしたい。

6.1 福成寺での 1.5m 望遠鏡の観測限界

シーイングと夜光輝度の典型値を得ることが出来たので、福成寺に 1.5m 望遠鏡を置いた場合の観測限界について、開口測光 (aperture photometry) を例に評価してみる。等級 m の星に口径 1 m の望遠鏡を向けたときに、波長 () における単位時間当たり、単位波長当たり ($\text{sec}^{-1} \text{Å}^{-1}$) に集めると期待される光子数 N は、

$$N = 4.5 \times 10^{10} / \lambda^2 \times \exp[0.4(m + A X)] \text{ 個 sec}^{-1} \text{Å}^{-1}$$

となる [11]。ここで、 A は大気減光 (等 airmass⁻¹) で、は見通す大気量 (airmass; 天頂を 1) である。等級 m は、フラックス f を用いて $m = -2.5 \log f - 48.59$ とあわせてる。

主鏡有効径 1.5 m、副鏡による遮蔽 0.303 m、焦点面スケール 11.27 秒角 mm⁻¹、1/2 縮小光学系を採用、大気減光 0.15 等、Rバンド有効波長 6600、有効波長幅 1100、検出器ピクセルサイズ 15 μm、読み出しノイズ 4 e⁻、望遠鏡の反射率 0.9³=0.729、装置の効率 0.65 として、シーイングサイズの 3 倍にわたる円領域の輝度を積分する開口測光を考えて誤差評価をする。AB等級とRバンド等級の差として+0.182 [12]を採用する。

以上のパラメーターにより、測光精度 (S/N 比) を計算した結果を図 6.1 に載せる。この図では、観測環境が良好な場合として、シーイングサイズを 1.1 秒角、夜空輝度を 20 等としたものと、環境が比較的悪い条件として シーイングサイズ 1.5 秒角、夜空輝度 19 等の 2 通りを考えている。観測限界の条件として S/N=50 (等級誤差 0.02 等)、検出限界として S/N=5 を採用すると、ガンマ線バーストの初期観測で想定される 1 分間露出の場合で、観測限界はおおよそ R=18-19 等、検出限界は 20-21 等となる。偏光測定の場合はこれに比べてほぼ 5 等級下がるが、15 等程度まで偏光観測が可能であるというのは目指す天文学において十分な性能である。また、未同定ガンマ線源の同定では 3 時間程度の露出時間も想定されるが、その場合の観測限界はおおよそ R=21-22 等、検出限界は 23-24 等となる。この検出限界は、8.2m すばる望遠鏡における低分散分光の限界とほぼ一致しており [13]、すばる望遠鏡の準備観測としての用途においても、十分な性能を発揮できそうである。

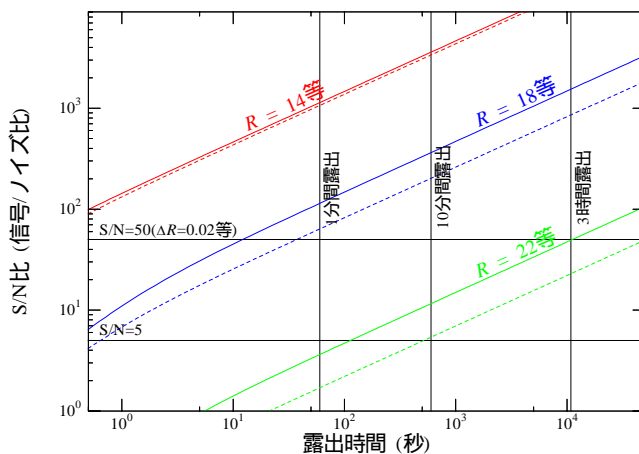


図 6.1 福成寺に 1.5m 望遠鏡を置いた場合の誤差評価。R 等級が 14, 18, 22 等それぞれの恒星を、露出時間を変えて開口測光を行った場合の誤差。実線は 良好な天候の場合 (夜空輝度 20 等、シーイング 1.1 秒角) で、点線は 貧弱な天候の場合 (19 等、1.5 秒角) の S/N 比を表している。ガンマ線バーストの初期観測で想定される 1 分間露出での観測限界は 18-19 等、検出限界は 20-21 等と見積もられる。

6.2 福成寺移設の場合の年次計画（案）

福成寺に移設する場合には、土地の手配に始まり、取り付け道路の設計建設、土地・インフラ整備、地盤調査、ドーム建設などの作業が順に入ることになる。その年次計画について、現状では図 6.2 のように考えており、2004 年 9 月には取り付け道路建設に着工し、2005 年春には地盤調査を行った後、ドーム建設に入り、2005 年冬には望遠鏡を移設する見込みである。これにより、2006 年春には観測を開始し、2007 年のガンマ線衛星 GLAST の打上げまでに装置や観測体制の整備を行う予定である。

スケジュール表		タイトル 広島大学宇宙科学センター 天文台(1.5m光学望遠鏡)建設スケジュール																																																																							
日付範囲		2004年												2005年												2006年																																															
2004/03/28~2006/08/02		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月																																
研究計画	人員・体制整備／サイト調査／概念設計													観測施設整備／可視光装置開発												可視光観測定常運用／赤外線																																															
	▲センター設立													▲ドーム建設開始												▲望遠鏡移設																																															
	▲用地確定													▲道路建設開始												▼Enh.FL																																															
	●岡山UM・光天通シンボ													▲Astro-E2打上げ												▲カセグレン試験																																															
	●天文学会													●天文学会												▼Sci.FL																																															
														●天文学会												▲主鏡蓋着																																															
観測地調査	観測条件調査	定常気象・シーイングモニター																																																																							
ドーム施設・制御棟設計・建設・整備・改良	概念設計	行政庁打合せ 計画・設計・積算・地盤調査												ドーム・制御棟建設												ドーム制御系整備																																															
1.5m望遠鏡ハードウェア														自動追尾・縮小光学系設計												自動追尾・縮小光学系製作												三鹿解体												望遠鏡移設 三原→広島												自動焦点切替器・巻回											
1.5m望遠鏡・ドーム制御ソフトウェア														自動制御ソフト開発												現地ネットワークおよび制御ソフト開発												カセグレン焦点調整																																			
観測機器														可視光／近赤外カメラ設計												可視カメラ製作												可視分光偏光器開発												可視カメラ運用調整												可視分光偏光器調整											
用地・道路・インフラ(東広島市)	道跡調査	道路敷地取												道路造成・敷地整地												電気・上下水整備																																															

広島大学 宇宙科学センター

スケジュール表		タイトル 広島大学宇宙科学センター 天文台(1.5m光学望遠鏡)建設スケジュール																																							
日付範囲		2006年												2007年												2008年															
2006/03/28~2008/08/01		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
研究計画		可視光観測定常運用/赤外線装置開発												定常観測・共同利用開始、自動制御化												全定常運用・成果出し															
		▲カセグレン試験 ▲カセ定常運用 ▼Sci.FL ▲主鏡蒸着 ●日本天文学会												▲アズミス試験 ▲アズ定常運用 ●GLAST打上げ ●日本天文学会												▲主鏡蒸着 ●日本天文学会															
		●日本天文学会												●日本天文学会												●日本天文学会															
		定常観測(Astro-E2との連携した可視観測)												定常観測(GLAST/Astro-E2と連携した可視・近赤外線観測)																											
候補地調査		定常気象・シーイン												気象・シーイングモニターアーカイブ/配信																											
ドーム施設・制御棟 設計・建設・整備・改良		ドーム制御系整備												ドーム保守・運用 自動制御システム設計												ドーム保守・運用 自動制御システム開発															
		ドーム保守・運用 リモート観測システム開発																																							
1.5m望遠鏡 ハードウェア		自動焦点切替器、像回転補正器 開発												ナスカセ 総合調整												望遠鏡保守・運用 自動制御システム開発															
		望遠鏡保守・運用 リモート観測システム開発												総合調整																											
1.5m望遠鏡・ドーム 制御ソフトウェア		カセグレン焦点 調整												自動制御ソフトウェア設計												ナスカセ 総合調整															
		自動観測システム開発												総合調整												リモート観測システム開発															
観測機器		可視カメラ運用調												可視装置定常運用・改良 近赤外線カメラ開発												近赤外線カメラ運用・改良															
		試験観測 総合調整												第2期観測装置設計																											
用地・道路・インフラ (東広島市)																																									

広島大学 宇宙科学センター

図 6.2 福成寺周辺候補地移設の場合の年次計画(案)

7 謝辞

本報告書の作成に当たっては多数の方々の協力を得ることができました。

京大 DIMM、および夜空輝度測定機材の借り受けに際しては、京都大学望遠鏡ワーキンググループの皆様、および国立天文台岡山天体物理観測所の皆様にお世話になりました。特に、国立天文台光赤外研究部の岩田生氏、岡山天体物理観測所の服部堯氏、柳澤顕史氏、沖田喜一氏には多方面でお世話になりました。岡山天体物理観測所の小矢野久氏、京都大学の和田晋平、木村仁彦両氏にも作業等で御協力いただきました。国立天文台ハワイ観測所の浦口史寛氏には、我々からの太陽 DIMM に関する質問に対して丁寧な御回答を寄せて頂きました。

福成寺周辺候補地の選定にあたっては、国立天文台岡山天体物理観測所の吉田道利所長、沖田喜一助教授、柳沢顕史上級研究員各氏には数々の貴重な助言を頂きました。岡山構内の候補地に関わる作業や調査についても多大なご支援とご指導を頂きました。国立天文台の海部宣男台長、観山正見副台長にも助言頂きました。特に岡山の皆様には、太陽 DIMM におけるシーイング測定を初め、ドーム設計の検討など数多くの場面においてお世話になりました。また、大阪教育大学の定金晃三教授や前岡山天体物理観測所所長の前原英夫氏にも貴重な助言を度々頂きました。

土地調査においては東広島市関係機関にお世話になりました。特に企画部企画課には色々と導いて頂きました。また福成寺地域の方々には寛大なご協力を頂き、感謝しています。

これらの活動において、学術部支援グループの皆様、とりわけ青山恵子副課長と中尾健二主査には多方面でお世話になりました。また牟田泰三学長にも度々助言を頂きました。また施設管理部施設計画グループの皆様にもドーム設計・配置案策定など、度々お世話になりました。

シーイング調査の多くについては、当時広島大学大学院理学研究科宇宙・素粒子科学講座に所属していた上田篤氏（現、株マツダ）が主力となって行い、自身の修士論文としてまとめた結果を拝借しました。またシーイング測定にあたっては、同講座に所属する院生・学生の多くにご支援を頂きました。広島大学大学院教育学研究科自然システム教育学講座の林武広教授と、林研究室の修士1年の石井隼人氏には、気象センサーの提供、シーイング測定支援に留まらず、多方面でご協力を頂きました。洞山用倉地区気象調査報告書の手配にあたっては、広島大学地域連携センターの橋本教授にお世話になりました。

その他、ご協力いただいた皆様も含め、この場所を借りて感謝申し上げます。

8 参考文献

- [1] Azouit, M., & Vernin, J. 1981, *J. Atm. Sci*, 37, 1550
- [2] Lena, P., Lebrun, F. & Mignard, F. 1998, *Observational Astrophysics* (Berlin: Springer)
- [3] 和田 晋平、他 2004, 国立天文台岡山天体物理観測所(OAO)サイト調査: 接地境界層の評価, 国立天文台報, 投稿済
- [4] 岩田 生 2003, ドーム候補地とサイト調査報告(DIMM), 2003年度岡山ユーズミーティング集録, 121
- [5] 上田 篤 2004, 天体観測に与える大気の影響とシーイング測定 広島大学宇宙科学センター望遠鏡設置場所調査, 修士論文(広島大学)
- [6] 浦口史寛 2000, 岡山観測所環境モニターの現状について, 2000年度岡山ユーズミーティング集録, 53
- [7] Sarazin, M., & Roddier, F. 1990, *Astronomy & Astrophysics*, 227, 294
- [8] Soules, D. B., et al. 1996, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 108, 817
- [9] 柳澤顕史、下農淳司他 2001, 岡山天体物理観測所の簡易シーイング統計, 2001年度岡山ユーズミーティング集録, 253
- [10] 岩田生、島尚徳、衛藤茂、藤村実代子、持田大作他、OAOと美星天文台での空の明るさ、<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwata/newtel/>
- [11] Massey, P. et al. 1988, *Astrophysical Journal*, 328, 315
- [12] Fukugita, M., et al. 1996, *Astronomical Journal*, 111, 1748
- [13] Kashikawa, N., et al. 2002, *Publ. Astron. Soc. Japan* 54, 819
- [14] 気象庁電子閲覧室 <http://www.data.kishou.go.jp/>
- [15] 洞山用倉地区気象調査報告書(昭和56年5月16日~昭和57年5月15日), 広島県土木建築部空港港湾局
- [16] 日本気候図 1990年版 1993, 気象庁
- [17] 吉田道利、清水康広他、1998, 岡山天体物理観測所気象モニターの開発, 国立天文台報, 3, 135