

基本方針および概念設計

京大岡山新技術望遠鏡外部評価資料

1 イントロダクション

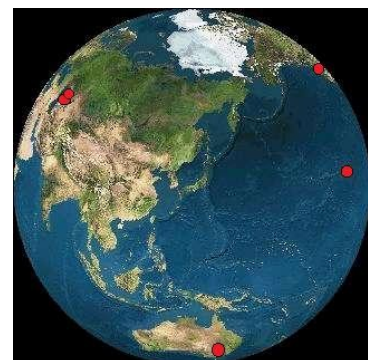
すばる望遠鏡をはじめとする口径 8–10m の大型望遠鏡は、20 世紀末から今世紀にかけて、天文学を大いに前進させ、それによって人類の宇宙に関する知識は飛躍的に増大した。最初の 10m 望遠鏡が稼働してから 15 年あまりが経過し、今また次のブレークスルーを目指して口径 30m 級の望遠鏡計画が進みつつある。こうした望遠鏡の大口径化は、ガリレオが自らレンズを組み合わせて作った望遠鏡を天空に向けて以来 400 年、「より遠く、より暗く、より詳しく」を追及してきた観測天文学にとって、必然的な一つの発展の方向性であると言える。

しかしながら、望遠鏡の大口径化だけが光赤外線天文学の発展の道ではない。世界では口径 3–4m クラスの中口径望遠鏡も現在数多く建設されており、その専有性を活かして広視野探査などに特化した観測が行なわれ、その機動性を活かして突発天体現象など激しく活動する宇宙の姿が明らかにされている。世界にわずかしかない大口径の望遠鏡と、柔軟に運用できて大口径望遠鏡とは異なるパラメータ空間で観測を実行できる数多くの中小口径望遠鏡とは、天文学およびそのコミュニティの健全な発展のためにそれぞれ相補的な役割を担うものである。

本計画は、こうした背景を踏まえ、大学での独自のサイエンスの展開、将来へ向けての技術開発、大学の基盤強化と人材育成、および一般社会への貢献などを目的として、京都大学が口径 3.8m の新技術望遠鏡を建設する計画である。以下にそれぞれの目的について述べる。

1.1 中口径望遠鏡によるサイエンス

ガンマ線バーストの可視光閃光の発見、系外惑星の発見と探索、銀河ハロー中のコンパクト天体の探索など、中小口径望遠鏡がその機動力や専有性を活かし、新たな天文学分野の開拓に威力を発揮してきた例は枚挙にいとまがない。現在、日本を中心とした北西太平洋地域には、口径 3m を超える光学赤外線望遠鏡が存在しない。この地理的



条件を活用してガンマ線バーストやブラックホール天体などの突発天体現象のユニークな分光・偏光観測を行ない、また独自に系外惑星探査を進め、超高分散分光観測から星・惑星系形成領域の物理を極めるなどによって、天文学の最先端を切り開くことが本計画の目的である。

1.2 望遠鏡技術開発

望遠鏡の大型化には分割鏡技術が不可欠であり、鏡を効率よく大量生産する技術も欠かせない。また、従来の望遠鏡構造を踏襲したのでは、大型化による建設費の増加と機動性の低下は避けられない。従って架台部分にも斬新な構造が必要となる。これらの技術を開拓することが、本計画の一つの目的である。

1.3 大学の基盤強化

3.8m望遠鏡は、国内最大の光学赤外線観測天文学の研究拠点として、国立天文台、産業界との密接な連携の下、大学間連携で共同運用するものである。中口径の望遠鏡ならではの研究プロジェクトを大学間連携等の仕組みを使って行なっていくことで、各大学の天文学研究を活性化し、人材育成に大きな効果をあげることが期待される。

大学間連携で共同運用するものである。中口径の望遠鏡ならではの研究プロジェクトを大学間連携等の仕組みを使って行なっていくことで、各大学の天文学研究を活性化し、人材育成に 天文学に対する国民の関心はきわめて高い。しかしながら、現在の学校教育や社会教育の場において、天文学の教育や普及が行なわれる機会は決して多いとはいえない。岡山天体物理観測所に最先端技術を結集した望遠鏡を建設することは、小中高大学生から一般の人々の科学に対する興味をいっそう喚起し、天文学の普及に資することがおおいに期待される。

地元の期待は極めて高く、そこで、地域との堅固な協力のもと、望遠鏡を見学可能にし、年に何度かの公開、大学間連携による天文教育の実施等を行なう。これによって、国民の科学リテラシーの向上に寄与し、科学技術立国に向けた取り組みの一つとしたい。

また、本計画は産学連携によって天文学の最先端の研究設備を作る、わが国としては初めてと言って良い試みであり、日本の高い技術力を用い、それを純粋科学の研究に生かしてまた産業界へとフィードバックする仕組み作りに貢献したいと考えている。

2 天文学からの要求性能

3.8m 望遠鏡の研究課題は、国内の専有望遠鏡（「ホームテレスコープ」）という利便性を活かした天文学の研究である。本章ではそれらの概要と望遠鏡に必要な性能（下節では●で箇条書き）を述べる。

2.1 サイエンスプログラムのまとめ

2.2 サイエンスからのトップレベル要求

2.3 サイエンスからの要求の詳細 となっている。

2.1 サイエンスプログラムのまとめ

2.1.1 突発天体现象

突発天体とは、急激に増光や減光を示すなどの激しい光度変化を、突発的に示す天体をいう。ガンマ線バースト、超新星、新星、激変星、X線トランジェント（X線新星）など、代表的な突発天体现象（激変天体现象）の多くは高密度天体（白色矮星、中性子星、ブラックホール）に落ち込むガスが明るく光り、観測されるものである。このような突発天体现象の研究は、相対論的天体の天体物理的理解において大きな意義がある。また、それ以外にも強烈な個性を持つ天体が宇宙に数多く存在する。

こうした突発天体は、激変星など 19 世紀から知られているものがある一方で、現在でも新種の天体（ハイパーノバ、超短時間型 X 線新星など）の発見が相次いでおり、今後も新種の現象の発見が期待される。これらは国内に適当な望遠鏡がなかったために、天体そのものの観測機会を失ってきた可能性が極めて大きい。特にガンマ線バーストの可視光対応天体のように、数時間といった極めて短い時間で変光（減光）する天体が発見されてきている。逆に言えばこれらの短時間現象の即時対応を得意とする望遠鏡や観測装置が使えるようになれば、世界最先端の研究を進めることができる。本計画による望遠鏡は、日本の経度付近における中口径望遠鏡の欠如を埋め、日本が夜である時間帯に発生する貴重な天体现象を捕まえること、および 24 時間連続観測ネットワークの形成等に活躍することが期待される。

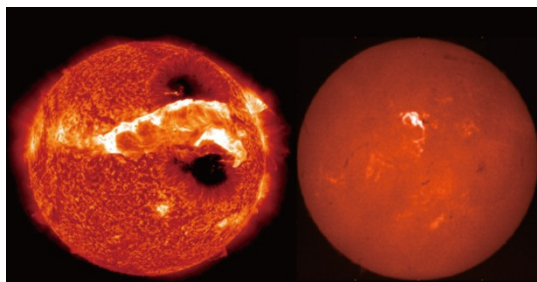
- 銀河系内の天体を観測できる十分な口径
- 近赤外線中分散分光
- 可視近赤の面分光
- 可視・近赤外におけるミリ秒レベルの高速測光、偏光観測
- 混雑した領域でも観測できる空間解像度
- 機動性の高い望遠鏡
- 日本に建設される望遠鏡

2.1.2 スーパーフレア星

太陽は地球上の全ての生命活動の源である。しかし、大きな太陽表面爆発(フ

レア)は社会インフラや生物全体に極めて深刻な影響を及ぼす。

我々が太陽に似た星の活動性を調べるため、ケプラー衛星のデータを精査したところ、約 150 個の星でスーパーフレア(太陽で観測された史上最大のフレアの 10 倍以上のエネルギー規模のフレア)を発見し(Maehara et al. 2012)、さらにベキ乗則から、最大級の太陽フレアの 100 倍のエネルギーのフレアが 800 年に 1 度の頻度で起こることが示唆された。このようなスーパーフレアが太陽で起これば、地球文明に甚大なる被害がもたらされることは明らかである。さらにスーパーフレアの研究はダイナモ機構の研究、太陽・恒星フレアの機構の研究、さらに将来の太陽・恒星フレアの惑星に与える影響など宇宙生物学的な研究にもつながるであろう。



太陽に似た星におけるスーパーフレアの想像図と、太陽における大フレア(右図 2001.4.10)

スーパーフレア星の性質と活動

性の変化を明らかにするために、系統的な探査と継続的なモニター観測を行うことが重要である。

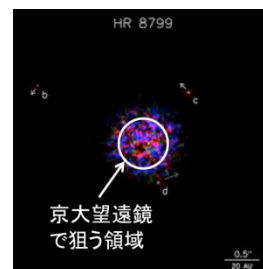
- 可視光高分散分光観測(3900–8700Å, R=30,000–50,000 程度)
- V~13 程度の星を数時間程度の露出で S/N~100 を実現できる口径
- 長期的な専有観測時間

2.1.3 系外惑星

近年の天文学上の大発見の一つに、太陽系外惑星がある。1995 年以来 次々と発見され、今や惑星系は稀な存在ではなく、普遍的に存在するものと考えられている。日本でも、岡山天体物理観測所で系外惑星探査がなされており、これにより中質量星の周りの惑星系が多数見つかった。発見された系外惑星の中には、地球と同様、 H_2O が液体として存在することのできる「居住可能領域」(ハビタブルゾーン) 近くに位置する惑星さえある。

すでに存在が明らかになった惑星を分光観測しその性質を明らかにすることや、さらに主星に近い領域で新たな惑星を直接撮像していくことが次なる目標であり、そのためにはすぐれた Inner Working Angle (IWA; 主星のどれだけ近傍まで高いコントラストで観測できるか)を備えた観測装置を、豊富な観測時間が得られる良好なサイトの、次のような望遠鏡に取り付けることが必要である。

- 近赤外線での極限補償光学 (ExAO) が可能



Keck 望遠鏡で直接撮像された 3 惑星(Marois+ 2008)と、目標とするもっと主星に近い領域

- 素性の良い回折像（円形開口）
- 十分な口径

2.1.4 星・惑星形成

我々の太陽系や、最近発見されつつある系外惑星系のような星・惑星系は、原始惑星系円盤とよばれる、塵とガスからなる円盤中で形成されると考えられている。円盤内で塵が集積し、ガスを取り込み、また残ったガスを散逸させるといった過程を観測的に明らかにすることは、惑星系形成を理解する上で極めて重要である。

円盤内の塵成分に関しては、測光観測によりこれまでに多くの研究がなされてきた。一方、ガス成分を観測するためには、分光観測が必要となる。特に円盤から放射される、強度が弱く線幅の細いスペクトル線を測定するには、高分散分光観測が必要である。原始惑星系円盤からの水素分子輝線の時間変動や、太陽系の彗星での塵表面反応分子スペクトル線の観測がそれにあたる。これらの過程を観測的に解明することにより、原始惑星系円盤の物理的・化学的構造の解明に至る糸口が得られる。

- 近赤外線の高分散分光と測光観測
- 高空間分解能
- 銀河系内の星形成領域を観測できる十分な口径

2.1.5 QSO の形成・進化

宇宙の歴史の中で、銀河とその中心に位置する大質量ブラックホールが共に進化してきたとされる観測事実は、両者の空間スケールがあまりにも違うことからさまざまな興味を呼び起こしている。近年、近赤外の広視野カメラの公開データなどから、非常に赤い QSO の探査 (Banerji et al. 2012, arXiv:1203.5530 など) が進められてきており、それらの性質が徐々に明らかになりつつある。しかし、それらの赤い QSO の長期的なモニタ観測はまだほとんど行われておらず、活動領域のサイズや成長速度をより詳細に調べるためにも、数年のタイムスケールでの時間的な変化を含んだ観測が必要となっている。近赤外でのみ見える広帯域輝線と透過してくる連続光成分を用いての Reverberation Mapping 法による赤い QSO の正確なブラックホール質量の推定、変光成分から、中心核への質量降着率の変化やその他様々な物理量に関して可視光で明るい AGN との違いを統計的に調べることにより、これらの赤い QSO がどのような環境で成長し、今後どのように進化するか、また母銀河との共進化の観点から母銀河の性質との関係などについても新たな知見が得られるものと期待できる。

- 近赤外の広い波長域での分光と測光

2.2 サイエンスからのトップレベル要求

以上のサイエンスプログラムからの要請により本望遠鏡に必要な優先度の高い性能は以下ようになる。

- 国内の 2 m クラスの望遠鏡よりも有意に大きな口径 (4 m クラス)
- 機動性の高い望遠鏡
- 高空間分解能と実効的に充分広い視野
- 国内でも信頼性の高い技術で補償光学 (AO) が達成できる口径
- 観測波長 0.4 – 2.4 μm
- 国内での建設
- 素性の良い回折像 (円形開口)
- 高効率で安定な運用



国立天文台 岡山天体物理観測所

2.3 サイエンスからの要求の詳細

2.3.1 口径

本望遠鏡計画のねらいは、1) 世界にある 2m クラスの突発天体専用の望遠鏡と、2) 国内にある 2m クラスまでの汎用望遠鏡 に対する有意な性能向上である。限界等級は口径を R とすると $2.5\log R$ (シーイングのバックグラウンドリミット) または $2.5\log R^2$ (回折限界のバックグラウンドリミットなど、先述以外の場合) となる。2m クラスの望遠鏡より 1 等級深い観測を狙った場合、望遠鏡の口径は 4m クラスとなる。一方、同じ限界等級の観測をする場合、2m クラスに対して積分時間で 1/4 倍から 1/16 の観測時間で達成でき、その分 広範囲な観測が可能となる。また、このサイズであれば、突発天体の同定作業を経て、大望遠鏡に対して有益な情報を提供することも可能となる。

一方、望遠鏡の機動性の観点から口径は制限される。一般に望遠鏡の口径の 3 乗で望遠鏡重量は増加し、加速度を低下させる慣性質量も 2–3 乗で増加する。現存する 2m クラスの望遠鏡でも加速度 = 0.1 度/s²、最大速度 = 1 度/s 程度である。突発天体を 30 秒程度で捕捉するには望遠鏡の 1/5 程度の軽量化を実現した上でも 4m 程度が限界である。

2.3.2 限界等級

1時間(可視光 15min×4, 近赤外 1.5min×40)、S/N=5として期待される限界等級は以下ようになる。

観測波長域	限界等級 (1時間積分・S/N=5)
Bバンド	25.8等級
Vバンド	25.1等級
Rバンド	25.0等級
Iバンド	24.3等級
Jバンド	22.5等級
Hバンド	21.7等級
Kバンド	21.2等級

口径：3.8 m、ピクセルスケール：0".15/pix、測光アパーチャ：φ1".5、岡山の空の明るさ：V=19.5/arcsec²、大気+システム透過率：50%を仮定

2.3.3 結像性能

結像性能は以下のようなサイエンスに直結したパラメータである。

- 限界等級：よりシャープな結像性能であれば、より暗い点源を観測が可能となる。
- 空間解像度：解像度は天体の構造を議論する上で不可欠であり、0".5–1".0の空間分解能が求められる。
- 高いダイナミックレンジの測光：銀河中心など星が混雑した場所では、星を個別に識別することで測光精度が向上する。

AOを行なうことで望遠鏡固有の結像性能を向上することは可能であるが、4mクラスでかつ国内の気象条件に対応したAOの素子数はハワイなどにある10mクラスに必要なAOと同規模のものが必要となる。また、AOはどんな天体にも常に作動可能というわけではない。そのため、まずはナチュラルシーイングに比べて有意には劣化しない結像性能が求められる。岡山観測所での良好時ナチュラルシーイングは~0".8なので、最終結像性能 = 0".85を目指すこととする。すなわち望遠鏡とドームシーイングによる劣化は0".287以下とする。なお、最良時のナチュラルシーイングは0".5であり、このとき上記の望遠鏡とドームシーイングが加わると最終結像性能は0".58となり、最良時でも望遠鏡とドームシーイングによる劣化は少ないと言える。

AOを導入すれば近赤外線域での結像性能は向上する。将来のAO技術改善を見込み、現在最も観測に用いられているKバンドよりも短波長のHバンド(1.65

um) を基準とする。ここで 4m の口径による回折限界は $0''.087$ である。そのためには主鏡、副鏡、第三鏡の形状精度と面精度はそれぞれの構造関数を満たす必要がある。

2.3.4 焦点

◇ カセグレン焦点

光学面が主鏡と副鏡の 2 面だけという点で透過率に優れた最も一般的な焦点である。しかし、取り付けることのできる観測装置の大きさに制限があり、加えて装置の姿勢変化があるため高精度な分光装置には不向きである。加えて後述のナスミス焦点との交換には第三鏡を格納する機構も必要となり、システムが煩雑となる。以上の理由より本計画ではカセグレン焦点を採用しない。

◇ ナスミス焦点

45 度傾斜した平面の第三鏡により高度軸上に配置された焦点である。従って、この焦点上の装置には姿勢変化が生じない。そのため高精度な光学系を要する装置に相当である。また、鏡筒の側面にあるため、空間的にも余裕があり大型装置に相当である。斜鏡を用いることでこれによる器械偏光は生じるが、専有性の高い本望遠鏡では十分な較正を行なうことで解決する。第三鏡を回転することで容易に高度軸上左右の 2 つの焦点を交換できるという利点があり、専用観測装置で即応性が要求される突発現象を狙う本計画にはふさわしい焦点である。

◇ 主焦点

主鏡の焦点付近に配された焦点。広視野で明るくさらに透過効率の高い優れた焦点である。一方カセグレン焦点同様に装置の姿勢変化が生じること、さらに鏡筒上部に装置を配するため、望遠鏡への負担が非常に大きく全体の重量とコストを増加させる。また他の焦点との共存には副鏡の脱着が必要とされ極めて相性が悪い。機動性を重視する本望遠鏡では採用しない。

2.3.5 視野と結像性能

多くの観測が視野と結像性能に左右される。以下では観測モードとの関連性を述べ、本計画に必要な視野を示す。

◇ 可視撮像

最小で、補正レンズなしの 12 分角 ϕ (8cm ϕ)、将来的には $1^\circ \phi$ の撮像の

可能性も考慮する。

◇ 近赤外撮像

補正レンズなしでの 12 分角 ϕ (8cm ϕ) の視野を確保する。

◇ AO 撮像、AO 分光

波面参照星から半径 10 秒角以内で、特に分割鏡配置の位相エラーを小さく抑える必要がある。

◇ 視野のまとめ

当面は補正レンズなしの 12 分角 ϕ の視野のみを用い、広視野撮像・多天体分光の必要性が発生した際に、補正レンズを製作し可視近赤外の広視野観測に利用する。

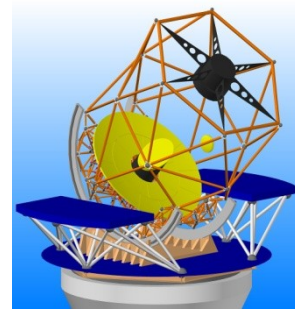
2.3.6 補償光学 (AO)

多素子の AO システムは系外惑星探査のような高空間分解を要する近赤外線観測に不可欠である。補償光学は低次の望遠鏡光学の誤差を修正する能力を有する点においても有意義である。補償光学には焦点付近の変換鏡または変換副鏡による方式が挙げられる。変換副鏡は光学面数が少ない点で有利であるが、困難な技術開発が予想される。本計画では H バンドでの補償光学を想定し、焦点付近の変換鏡方式を用いる。

3 概念設計

3.1 光学パラメータ

以上の条件から本望遠鏡の光学パラメータを以下の表のように設定する。



光学パラメータ詳細

主鏡有効口径	3783mm
主鏡焦点距離口径比	1.32
主鏡焦点距離	5000mm
主鏡非球面定数	-1.034609
副鏡有効口径	1059mm
副鏡焦点距離	1667.4mm
副鏡非球面定数	-2.73112
ナスミス引き出し量	1000mm
主鏡副鏡間距離	3700mm
主鏡第 3 鏡間距離	3000mm
合成焦点距離	22692.39mm
合成焦点距離口径比	6.00
焦点スケール	9".09/mm
像面曲率半径	
第 1 ナスミス焦点	1424.9mm
第 2 ナスミス焦点	2764.9mm
第 1 補正レンズ (球面)	
有効口径	480mm
第 1 面曲率半径	-982.95mm
第 2 面曲率半径	-1340.18mm
中心厚み	20mm
第 2 補正レンズ (球面)	
有効口径	480mm
第 1 面曲率半径	-555.85mm
第 2 面曲率半径	-463.45mm
中心厚み	20mm
第 3 鏡-第 1 補正レンズ間距離	2102mm
第 1 補正レンズ-第 2 補正レンズ間距離	2mm

3.2 主鏡

望遠鏡全体重量は主鏡の重量に比例するため、主鏡の軽量化は機動性が要求される本計画では不可欠である。4mクラスの主鏡のタイプには、1) 従来型モノリシック、2) 薄型メニスカス、3) ハニカム、4) 分割、の方式が考えられる。軽量化の観点から従来型モノリシックは論外となる。鏡自体の質量の観点からは分割方式が特にすぐれ、メニスカスとハニカムはそれに次ぐ。一方支持機構まで含めるといずれもアクチュエータを必要とするため単純な比較はできない。固有振動数の観点から力アクチュエータを必要とするメニスカスは劣る。固有振動数が10 Hz付近に設定される機動性の高い4mクラスの望遠鏡にはハニカム方式か分割鏡方式が適当である。ハニカム方式は硝材の熱膨張係数が大きく加工時と観測時温調システムを必要とする。システム信頼度と機械的安定性の観点からはハニカム形式が優れるが、本計画では支持機構も含めて軽量な主鏡と主鏡セルを開発することで軽量な分割鏡式望遠鏡を開発することとした。

3.3 指向と追尾

架台の駆動に関する諸元を以下に示す。本望遠鏡は突発性天体観測のため加速度と最高速度を一般の望遠鏡に比べて大きく設定する。

観測範囲	高度 20° - 89° 方位 ±270°
機械的可動範囲	高度 10° - 92° 方位 ±270°
追尾精度保証範囲	高度 25° - 88° 方位 ±270°
駆動 最高速度 最高加速度	高度 2° /s 方位 3° /s 高度 1° /s ² 方位 1° /s ²
指向精度	<3”(rms)
追尾精度 オープンループ クローズドループ	0.5” (10分追尾) 0.25” (60分追尾)
エンコーダ分解能 高度 方位	0.015” 0.015”

モータ分解能 (減速機構含む) (DD モータ) 高度 方位	0.015" 0.015"
副鏡駆動機構 駆動軸数 tilt 軸の許容移動量 ストローク 分解能	3(z)+1(y)+1(x) tilt[たれ]軸 <0.9mm(広視野) 5mm 角度 1", シフト 1um

3.4 サイトとドーム

2002年1月から2003年8月まで、計11晩のDIMMによる測定からシーイングの最頻値は $1.0-1''.2$ で、最良値は $0''.5$ である。また C_T^2 法による2002年8月から2003年10月までの計29日分のデータから、接地境界層の高さは最頻値が4-6mであり、15m以下に80%が含まれた。以上より、望遠鏡不動点は地上15m以上に設置し、ドームおよび望遠鏡等によるローカルシーイングを $0''.1$ 以下に抑えることが求められる。

3.5 誤差配分表

結像性能に関する誤差配分

単位 秒角

実行 PSF			0.287077	<0.287	
結像性能			0.27681		
	視野内収差			0.202544	
		回折			0.032
		光学収差			0.2
	主鏡			0.174929	
		セグメント形状			0.15
		セグメント配列			0.09
	副鏡と第三鏡			0.070711	
		副鏡形状			0.05
		第三鏡形状			0.05
	オートガイド			0.038588	
		計測誤差			0.02
		残存誤差			0.033
	ローカルシーイング			0.065574	
		ドームシーイング			0.05
		望遠鏡シーイング			0.03
		鏡シーイング			0.03

主鏡配列に関する詳細

主鏡配列				0.091104	
		SH			0.05
		PCS			0.05
		鏡エッジ形状			0.03
		エッジセンサ			0.02
		駆動指令値との誤差			0.02
		演算誤差(タイムラグ含む)			0.02
		制御残差			0.02
		内周リング			0.02
		主鏡横ずれ			0.02

望遠鏡指向精度と追尾精度に関する誤差配分

単位 秒角

指向精度			2.987495		
	構造			2.971532	
		方位エンコーダ原点 (IA)			0.2
		方位エンコーダ芯ずれ (ACEC-ACES)			1
		方位軸エンコーダ真円度			1
		方位軸傾斜 (AW-AN)			0.5
		方位軸高度軸直行度 (NPAE)			1
		高度軸光軸直行度 (CA)			1
		高度軸減点 (IE)			0.2
		高度エンコーダ芯ずれ (ECEC-ECES)			1
		高度軸エンコーダ真円度			1.5
		鏡筒撓み (TF-TX)			1
		装置位置+第三鏡			0.5
	制御誤差			0.308423	
		エンコーダ			0.07
		時間			0.015
		大気差補正			0.3
追尾精度				0.215058	
		指向精度からの誤差			0.125
		駆動誤差			0.02
		時間誤差			0.015
		主鏡位置誤差			0.1
		副鏡位置誤差			0.1
		第3鏡位置誤差			0.1