

技術報告

プラネタリウムのドームを使用した魚眼レンズの周辺減光の補正

鈴木 裕司 *

Correction of Optical Vignetting of a Circular Fisheye Lens Using a Planetarium Dome

SUZUKI Yuji

Abstract : By comparing the photometry of a planetarium dome taken with a normal lens and a circular fisheye lens at the same location, the amount of optical vignetting of the fisheye lens was measured and a correction formula was obtained. Using this formula, the brightness of the night sky was estimated, and it was found that the correction was insufficient at the periphery of the fisheye lens. Assuming that the ratio of the pixel values obtained with the fisheye lens and the normal lens is constant, the correction formula was calibrated. As a result, the correction formula successfully reproduced the values measured with the normal lens from the values with the fisheye lens. The correction formula was used to perform photometry of stars, and it was confirmed that the ratio of measurements by the fisheye lens and the standard lens was constant regardless of the brightness of the stars, although there was a large error in the measurement by the fisheye lens. Finally, the atmospheric attenuation coefficient was calculated from the photometry of the fixed stars using the correction formula.

キーワード : 魚眼レンズ, 周辺減光, プラネタリウムドーム

Key words : fisheye lens, optical vignetting, planetarium dome

はじめに

魚眼レンズは通常のカメラレンズの投影方式である中心射影方式を採用しないレンズのことである。広角レンズよりも広い範囲を写すことができるため、天文分野では比較的使用される。魚眼レンズは、写真の対角で180度の範囲を写すことができる対角魚眼レンズと、全方向にわたって180度の範囲を写すことのできる円周魚眼の2つに大きく分けることができる。円周魚眼レンズは、空の全体を写すことができることから、常時空を撮影するためのモニタカメラで使用されることがある。そのため、もし円周魚眼レンズで撮影した写真から天体や夜空の明るさを求めることができれば、広範囲の情報を一度に取得できるだけでなく、モニタカメラなどの時間分解能のあるデータを有効に活用することができる。

しかしながら、魚眼レンズは明るさの測定には通常使用されない。その理由は明るさのムラを補正することが困難だからである。天体観測ではカメラレンズの代わりに望遠鏡を使用するが、基本的にはレンズで光を集めてカメラで明るさを記録する点は同じである。どんな望遠

鏡やカメラレンズでも、カメラのセンサー面に均一な明るさで光を集めることはできず、中心が明るく周囲に行くほど暗くなる明るさ分布となる（周辺減光という）。天体観測では、これを補正するためにフラット画像を撮影する。フラット画像は、均一な明るさに照らされた壁面（望遠鏡のドームの内側など）を撮影することで取得することが多い。フラット画像には周辺減光だけでなく、レンズ上のゴミが原因の光のムラも記録されているため、観測毎に撮影をする。天体の画像の各ピクセル値をフラット画像の各ピクセル値で割り算をすることでレンズによる明るさのムラを補正することができる。

フラット画像は均一な明るさをもつ平面が必要なため、写る範囲が狭い望遠レンズほど取得の難易度が下がる。反対に広角レンズでは数十度にわたって均一な明るさの平面を用意することが困難であるため、フラット画像を撮影することは容易ではない。魚眼レンズに至っては180度の範囲が写るため、なおのことである。また、通常レンズが採用する中心射影方式は平面を平面に変換する投影方式であるが、魚眼レンズが採用する投影方式は球面を平面に変換するものである。そのため、魚眼

* 愛媛県総合科学博物館 学芸課 自然研究グループ
Curatorial Division, Ehime Prefectural Science Museum

レンズでフラット画像を取得しようとする、半球状で均一な面を用意する必要がある。

そのような環境はないと思うが、プラネタリウムのドームという特殊な場所であれば理想に近い環境を作り出すことができる。ドームはほぼ半球状の形をしており、当館の場合は半球が地平に接する部分に一周にわたってLED照明が設置されている。これによりドーム全体をほぼ均一に照らすことができる。この照明はプログラムによって出力制御をすることができるため、同じ明るさの状況を再現することができる。また、ドーム上にグリッドを表示することができるため、位置の参照としてグリッドを撮影しておくことで、ドーム内のどの場所を撮影したのかを記録することができる。

上記のような特徴を持つプラネタリウムのドームであるが、壁面には小さな穴が開いていたり、経年劣化があったりするため、均一な明るさの面とすることはできない。そのためフラット画像そのものを撮影することはできない。その代わりに、ドーム内の同一地点を標準レンズと魚眼レンズで撮影し、標準レンズで測定した明るさが魚眼レンズでどの程度暗く測定されるかを比較することで、魚眼レンズの周辺減光量を測定することができる。レンズ上のゴミなどの影響は除去できないが、もともと撮影時にフラットを取得できないため、周辺減光のみを補正できれば十分である。

本稿では、標準レンズと魚眼レンズでプラネタリウムのドーム内の明るさを比較した結果、およびそれを用いて恒星と夜空の明るさを正しく測定できているかを述べていく。

プラネタリウムのドームの明るさ測定について

撮影方法

プラネタリウムのドームを撮影した時のカメラの設定は表1の通りである。カメラは同一物にレンズを付け変えて使用した。ドームのちょうど中央には光学式投影機が位置しているため、そのすぐ上側の通路に三脚をセッティングして撮影した。魚眼レンズは全体を1枚で撮影することができるが、1ピクセル辺りの立体角が大きくなり測光時に使用するピクセル数が少なくなってしまう。そのため、ノイズを小さくするために同じ向きで撮影した写真を10枚平均して使用した。また魚眼レンズはSIGMAの円周魚眼レンズを使用した。SIGMAの魚眼レンズは投影方式が等立体角射影であるため、各ピクセル辺りの立体角が同一となり、夜空の明るさを測定するのに適している。標準レンズはドームにグリッドを表示させ、高度方向と方位方向の線の交点を基準として撮影位置を決めた(図1, 2)。それぞれの撮影の流れは、LED点灯した状態で「グリッド表示で撮影」「グリッド

消去して撮影」を1セットとして方向毎に繰り返した。このセットの間はカメラの位置は動かさない。グリッドのON/OFFはiPadを用いてコンソールまで移動せずに、撮影場所にて行った。

画像処理・測定

撮影後はそれぞれ画像変換ソフトraw2fits(星空公園, 2020)を用いてRAW形式からfits形式へ変換するとともにRGBの3色に分解した。その後、ダークを差し引き、標準レンズで取得した画像についてはフラット補正を行った。

各画像の明るさの測定はマカリイ(HORAGUCHI et al., 2006)を使用した。開口半径は1pixelとし、標準レンズと魚眼レンズの画像それぞれで方位方向の大きさが同じ程度になるようにSky半径を定め、Skyの平均をドーム内の明るさとして使用した(図3, 4)。

測定結果

まず、標準レンズで撮影したドーム内の各場所の明るさを図5に示す。図の横軸はpixelが単位となっている。なお、画像はベイヤー配列から各色を抜き出したものになるため、カメラの公表値よりも縦横ともに半分の大きさになり、2604pixel × 1738pixelとなっている。さらに、円周魚眼レンズで撮影した場合、中心からおおよそ750pixelまで撮影される。この図を見ると、中心から600pixel程度までは明るさがほぼ一定となっていることがわかる。中心から600pixelというのはドームの中心から半径約70度の範囲であり、広角レンズの周辺減光の補正にも非常によい対象であることがわかる。これより外の領域では、LED照明の光源に近づく関係で、明るさが急激に上昇している。

続いて、図6に魚眼レンズと標準レンズにおいてG画像で測定した値の比を中心部の値を1に規格化したものを示す。この図では半径方向のみの関係が示されており、方位が異なるデータはまとめて表示されている。しかしながら関係がほとんど分散がないことから、魚眼レンズの周辺減光は半径方向の距離にのみ依存することが確認できる。また、図7ではRGBのそれぞれの色における関係性を示しているが、こちらもほぼ変動がないことから、色による関係の違いも考慮しなくてよいことになる。そこで、それぞれの測定点においてRGBの3色分の値は平均をとり、方位が異なるデータを同列に扱って、魚眼レンズ/標準レンズの値の中心からの距離の関係性を求めたものが図8である。この曲線をうまく近似する多項式を求めると、次のようになる。

$$y = a_1x^6 + a_2x^5 + a_3x^4 + a_4x^3 + a_5x^2 + a_6x + b$$

ただし、

$$x = r/100$$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -7.029 \times 10^{-5} \\
 a_2 &= +1.082 \times 10^{-3} \\
 a_3 &= -5.880 \times 10^{-3} \\
 a_4 &= +1.416 \times 10^{-2} \\
 a_5 &= -2.487 \times 10^{-2} \\
 a_6 &= +1.884 \times 10^{-3} \\
 b &= +1.000
 \end{aligned}$$

である。求めた上記の関係式を用いることで魚眼レンズによる周辺減光を補正できると期待される。

夜空の明るさをを用いた校正

夜空の明るさの比較

ここでは実際に恒星と夜空を標準レンズと魚眼レンズで観測し、先ほど求めた関係式で補正ができていないかを確認する。バイヤー配列でカラーのフィルターが並んでいるデジタルカメラのセンサーでは、 2×2 の領域の内、Gは対角の2pixel、RとBはそれぞれ1pixelのみとなっている。大島(2011)によると、ピントを合わせた状態では恒星像が小さく、バイヤー配列で異なる色の担当部分に恒星像が入ることで、恒星の測光値が変化して変動を生じてしまうことが指摘されている。そのため、ある程度の領域を平均して測定に使用できる夜空の明るさを使って測定値の確認を行うこととする。

観測は2023年5月9日の21:23～24:38にかけて愛媛県四国中央市の翠波高原で行った。撮影の設定は表2の通り。魚眼レンズでの撮影は地面に対して固定して行い、標準レンズでの撮影は赤道儀を用いて恒星を追尾して行った。標準レンズでの撮影はしし座～かに座にかけての領域で行い、視野内のうち標準レンズ・魚眼レンズともに視認でき、魚眼レンズで複数の恒星が混ざってしまわない恒星として δ Cnc, a Cnc, λ Leo, η Leo, o Leoの5つの恒星を写真上で確認できる高度までマカリイを用いて測光を行うとともに、その周囲の夜空の明るさを測定した(図9, 10)。恒星の地平高度はアストロアーツ社のステラナビゲータ12で調べた。

測定している間に時間が進み、恒星の地平高度が下がるとともに、夜空の明るさが増しているのが見える。また、魚眼レンズでの写真上でも位置が変化していき、補正值が変化していく。それに対して標準レンズは追尾観測をしているため、光学系による測定値の変化を受けない。そのため、魚眼レンズでの測定値を補正することで標準レンズでの測定値を再現することができれば、魚眼レンズを用いて正しく測定ができたことになる。

図11は標準レンズで測定した η Leo周辺の夜空の明るさと地平高度の関係を示している。青い点は、マカリイの開口測光の設定を「自動」にして測光したものである。この設定では、恒星を測光した開口半径から約2pixel外

を内径として、そこから外に2pixelの範囲をSky測光に使用している。この時、多い場合でも使用されるのは120pixel程度となる。図を見ると、測定値が低い場合に測定毎の測定値のバラつきが大きくなっている。測定値が高い場合にはバラつきが小さくなっていることから、ダークノイズによる値の変動を受けていると考えられる。この時に、ノイズの影響を小さくするには対象の光量を上げることが有効であり、今回の場合は測定に使用するSkyのpixel数を増やすことで実現できる。そこで、マカリイでの測定の設定を「半自動」とし、Sky内径を7pixel、Sky幅を12pixelとした。この時Sky測光に使用されるのは1024pixelとなり、自動設定と比べて約9倍以上のpixelを使用することとなる。この設定で測定した η Leo周辺の夜空の明るさと地平高度の関係を図11の赤い点で示している。狙い通り、測定毎の測定値のバラつきが小さくなったため、この設定でSky測光をすることとする。

魚眼レンズで測定した明るさに対し、プラネタリアムのドームで求めた式を用いて補正を行った。測定した値を魚眼レンズの中心からの距離の関係で示したのが図12である。図中の縦軸は標準レンズで測定した値となっている。魚眼レンズで測定した値は、標準レンズの値に合うように、補正前は21で、補正後は26で割ってスケールリングしてある。

補正前後を比較すると、減光が大きく効いている周辺部で改善がしていることがわかる。しかし、それでも $r/100 > 6$ の部分では標準レンズよりも測定値が暗くなっており、補正が不足していることが確認できる。

周辺部の補正值の校正

プラネタリアムのドームを使用した測定値で、一番周辺のものでは、LED光源に近いことによる明るさの上昇が見られる部分に当たる。標準レンズと魚眼レンズのそれぞれで撮影された写真を比較すると、魚眼レンズで撮影した写真の方は標準レンズで撮影したものと比較して半径方向に縮んで記録されている(図13)。各々の測光範囲を定める時に方位方向が同じ程度の大きさになるように決めている。そのため、半径方向に見ると魚眼レンズでの測光範囲の方が半径方向に伸びた領域を測定していることになる。それにより、魚眼レンズでの測光範囲では標準レンズでの測光範囲よりも広く、周辺部の明るい部分が含まれてしまい、測光値が明るくなくなったと考えられる。これにより推定した周辺減光が弱く測定されてしまったことになる。

夜空の明るさの測定値の魚眼レンズと標準レンズの比と魚眼レンズの中心からの距離の関係を図14で示している。もし、補正によって標準レンズと魚眼レンズでの測定値が一致するのであれば、両者の比率は一定とな

るはずである。図 14 を見ると、 $r/100 < 5.0$ では比率が横ばいとなっているが、 $r/100 > 5.0$ では比率が直線的に下がっている。そこで、 $r/100 > 5.0$ のデータを用いて近似直線を求めると $y = -2.986x + 41.923$ 、変形して $y = -2.986(x-5) + 26.9885$ となった。この式を用いて $r/100 > 5.0$ のデータに対して $\{1-2.986(\frac{r}{100}-5.0)/26.9885\}$ の割合だけ減光率が大きかったと仮定し、補正式の校正を行った。この校正により求めた周辺減光の減光率は次のようになった。

$$y = a_1x^6 + a_2x^5 + a_3x^4 + a_4x^3 + a_5x^2 + a_6x + b$$

ただし、

$$\begin{aligned} x &= r/100 \\ a_1 &= +4.259 \times 10^{-5} \\ a_2 &= -9.245 \times 10^{-4} \\ a_3 &= +6.829 \times 10^{-3} \\ a_4 &= -2.082 \times 10^{-2} \\ a_5 &= +1.425 \times 10^{-2} \\ a_6 &= -8.504 \times 10^{-3} \\ b &= +0.9970 \end{aligned}$$

である。校正前後の補正式をグラフにしたものを図 15 に示す。

校正後の補正式を用いて夜空の明るさを補正し、魚眼レンズと標準レンズの比と魚眼レンズの中心からの距離の関係を示したのが図 16 である。図 14 と比較して、分布の中心が横軸と並行になっているのがわかる。

校正後の関係式を用いて夜空の明るさを補正したものが図 17 である。校正後の魚眼レンズの測定値は、27 で割ってスケールしている。標準レンズで測定した値と比較してほぼ一致する結果となった。これにより、魚眼レンズを用いて夜空全体の明るさを測定できるようになった。

恒星の測光

標準レンズと魚眼レンズの恒星の測光値で補正前のものを図 18 に、校正後のものを図 19 に示す。大島 (2011) の通り、ベイヤー配列の関係で、魚眼レンズによる測定値の分散(縦方向)は大きい。本来であれば、恒星の明るさに関係なく、標準レンズと魚眼レンズでは一定の変換係数で測定値を変換できるはずであるが、補正前は各恒星について暗い側で魚眼レンズの測光値が暗く出ており、標準レンズと魚眼レンズの関係に不連続な点が確認できる。これに対し、校正後は測定対象の恒星に関わらず、どの明るさにおいても一定(約 4 倍)の変換係数をもって標準レンズと魚眼レンズの測定値を変換できるようになった。

魚眼レンズによる測定の活用

補正式によって、魚眼レンズで恒星や夜空の明るさが測定できるようになった。この補正式はカメラとレンズの組み合わせによって変化すると考えられるが、フラット画像のように細かい光量の変化の補正までは意図していないため、一度測定しておけば長い間使用できると考えられる。

ここでは活用の一例として、大気減光係数の測定を行った。大気減光係数は、1つの恒星を追尾観測し、その明るさが大気量(エアマス)によってどのように変化するかを見ることで測定できる。これを魚眼レンズで行うと、夜空全体に対して測定ができるため、異なる方向での係数の違いを見ることができる。

測定には 2022 年 4 月 4 日 20:44 ~ 24:05 に、愛媛県四国中央市の翠波峰展望台にて撮影された画像を用いた。カメラは EOS Kiss X6i (Canon)、レンズは 4.5mm F2.8 EX DC CIRCULAR FISHEYE HSM (SIGMA) で、周辺減光を測定した時と同じである。

測光の対象とした恒星は、 θ Aur, ε Gem, ι UMa, κ UMa, ε Leo, η Leo, ζ Leo, γ Boo, δ Boo の 9 つである。天球上での位置に近いものを 2 ないしは 3 個セットとしており、距離に近いものは大気減光係数が似た値にあることを確認できる意図がある。これらの恒星が観測時間中に夜空のどの位置を移動していったかを図 20 に示す。撮影した画像の RGB のうち G 画像でこれらの恒星を、マカリイを使用して測光し、校正後の補正式を用いて魚眼レンズの周辺減光を補正した。地平高度は(株)アストロアーツのステラナビゲータを参照し、地平高度を基にエアマスを計算した。

得られたエアマスによる等級の変化の関係を図 19 に示す。減光量がわかればよいので、各恒星について正確な等級は計算せず、分布の重心を揃えて、大気減光係数を示す傾きが見やすいようにした。大気減光係数は高度が低い、つまりエアマスが大きくなるまで観測した恒星の測定値が強く反映されるが、夜空の位置に近い、西の空の θ Aur と ε Gem、東の空の γ Boo と δ Boo では分布の傾きがそれぞれ同じになっている。この傾きから大気減光係数を求めると、エアマスが 1 増加すると西の空では 0.2485 等級、東の空では 0.3619 等級暗くなる結果となった。東西で大気減光係数が異なるのは、大森(1994)でも確認されており、大気汚染につながるものが多い方向では大気減光係数が大きくなるとしている。翠波峰展望台から θ Aur と ε Gem の方向は四国中央市の土居の街があり、 γ Boo と δ Boo の方向は四国中央市の川之江の街がある。川之江には製紙工場が多数あり、工場からの排気が出ている。この影響で東の空の大気減光係数が大きくなっている可能性がある。

まとめ

プラネタリウムのドームを標準レンズと魚眼レンズで撮影し、同じ場所での測光値を比較することで、魚眼レンズの周辺減光量を測定し補正式を得た。これを用いて夜空の明るさを測定したところ、魚眼レンズの周辺部で補正が不足していることがわかった。魚眼レンズと標準レンズの測光値の比が一定になると仮定して補正式を校正したところ、魚眼レンズでの測定値から標準レンズでの測定値をうまく再現することができるようになった。これの補正式を用いて恒星の測光を行ったところ、魚眼レンズでの測定に誤差は大きいものの、恒星の明るさに依らず、魚眼レンズと標準レンズでの測定の比率が一定になっていることを確認できた。最後に、補正式を用いて恒星の測光を行い、大気減光係数を求めたところ、東西で異なる値を示し、工場からの排気によって大気状態が異なっている様子をとらえた可能性がある。

参考文献

- HORAGUCHI, T., FURUSHO, R., AGATA, H. and Paofits WG, 2006 : FITS Image Analysis Software for Education : Makali i. *ASP Conference Series*, 351, p.544-547.
- 星空公団, 2020 : 開発製品 (ソフトウェア) raw2fits. <http://www.kodan.jp/?p=products> (2022.06.17 参照).
- 大森茂雄, 1994 : 生田緑地上空における大気の吸収係数について. *川崎市青少年科学館紀要*, 5, p.25-28.
- 大島修, 2011 : デジカメ画像による光度測定, 2010年度 FITS 画像教育利用ワークショップ <https://paofits.nao.ac.jp/FITSWS10/DCphoto.pdf> (2023年5月19日参照).

表 1

ドーム撮影時の設定項目	標準レンズの設定	魚眼レンズの設定
カメラ	EOS Kiss X6i (Canon)	EOS Kiss X6i (Canon)
レンズ	EF40mm F2.8 STM (Canon)	4.5mm F2.8 EX DC CIRCULAR FISHEYE HSM (SIGMA)
ISO 設定	100	100
F 値	5.6	2.8
露出時間	4 秒	4 秒
保存形式	RAW	RAW
長秒時ノイズ	OFF	OFF
高感度ノイズ低減	標準	標準
備考	1 枚撮影で測光	10 枚撮影し平均

表 2

校正用撮影時の設定項目	標準レンズの設定	魚眼レンズの設定
カメラ	EOS Kiss X6i (Canon)	EOS Kiss X6i (Canon)
レンズ	EF40mm F2.8 STM (Canon)	4.5mm F2.8 EX DC CIRCULAR FISHEYE HSM (SIGMA)
ISO 設定	100	400
F 値	5.6	2.8
露出時間	20 秒	30 秒
保存形式	RAW	RAW
長秒時ノイズ	OFF	OFF
高感度ノイズ低減	標準	標準
備考	赤道儀で追尾撮影	固定撮影

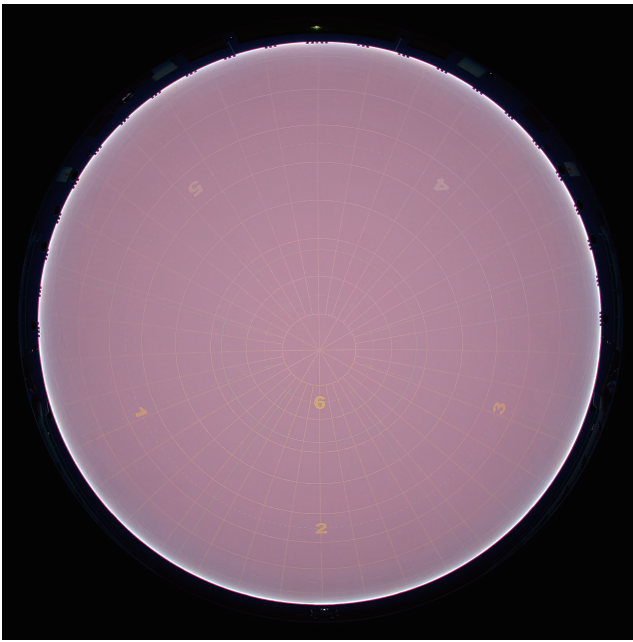


図1 プラネタリウムドームのグリッド

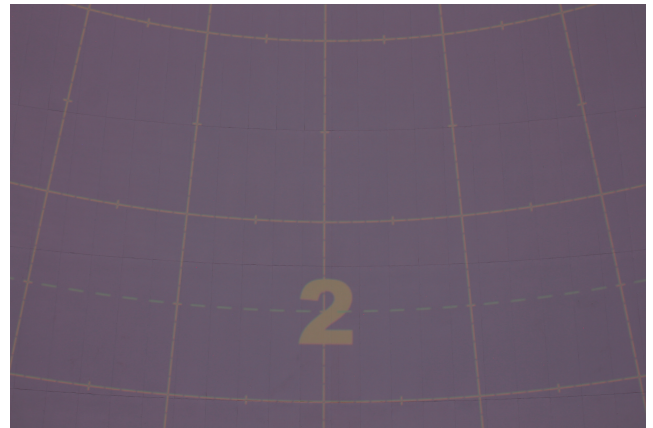


図2 焦点距離 40mm のレンズで写る範囲

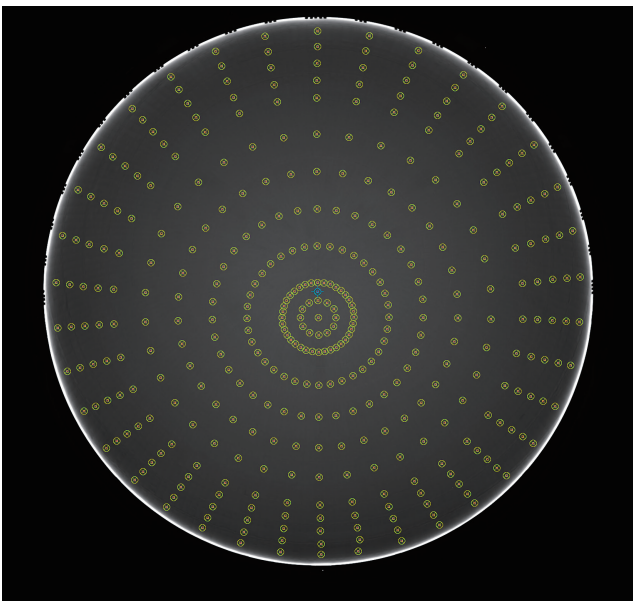


図3 魚眼レンズの画像での測定点

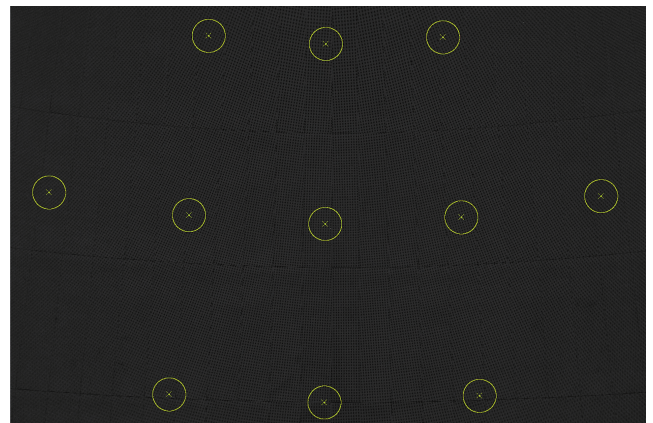


図4 図2の範囲内の測定点

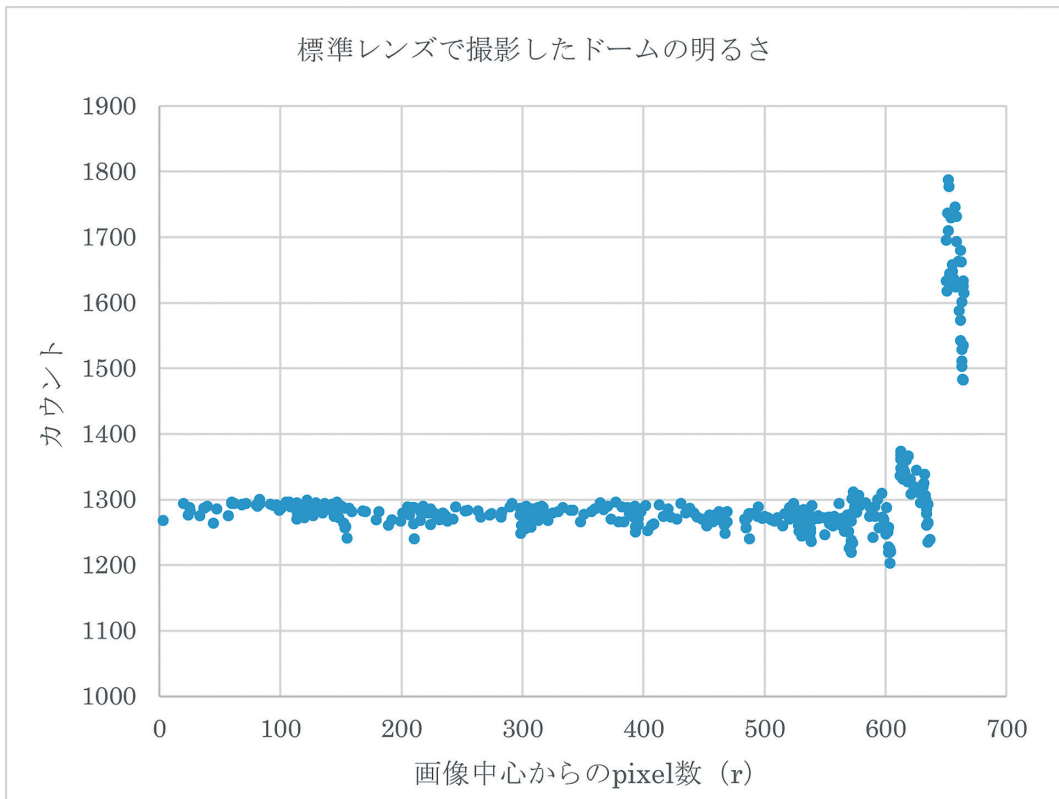


図5 画像中心からの距離とドームの明るさ

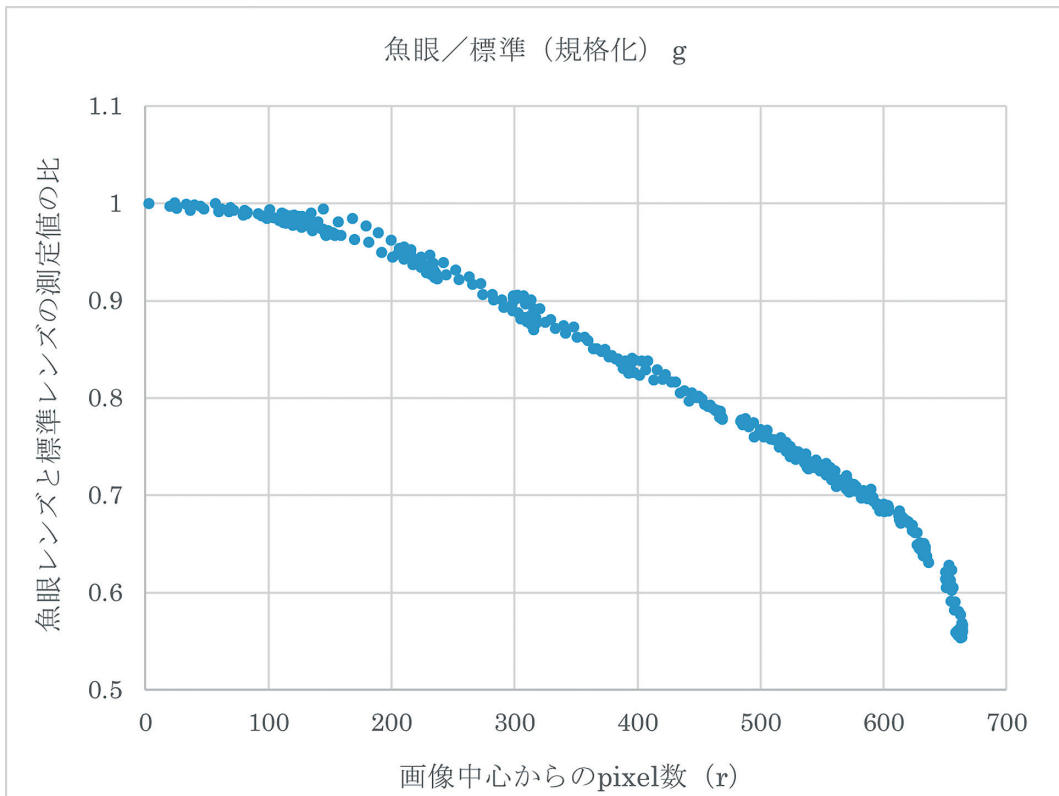


図6 画像中心からの距離と魚眼レンズと標準レンズの測定値の比率

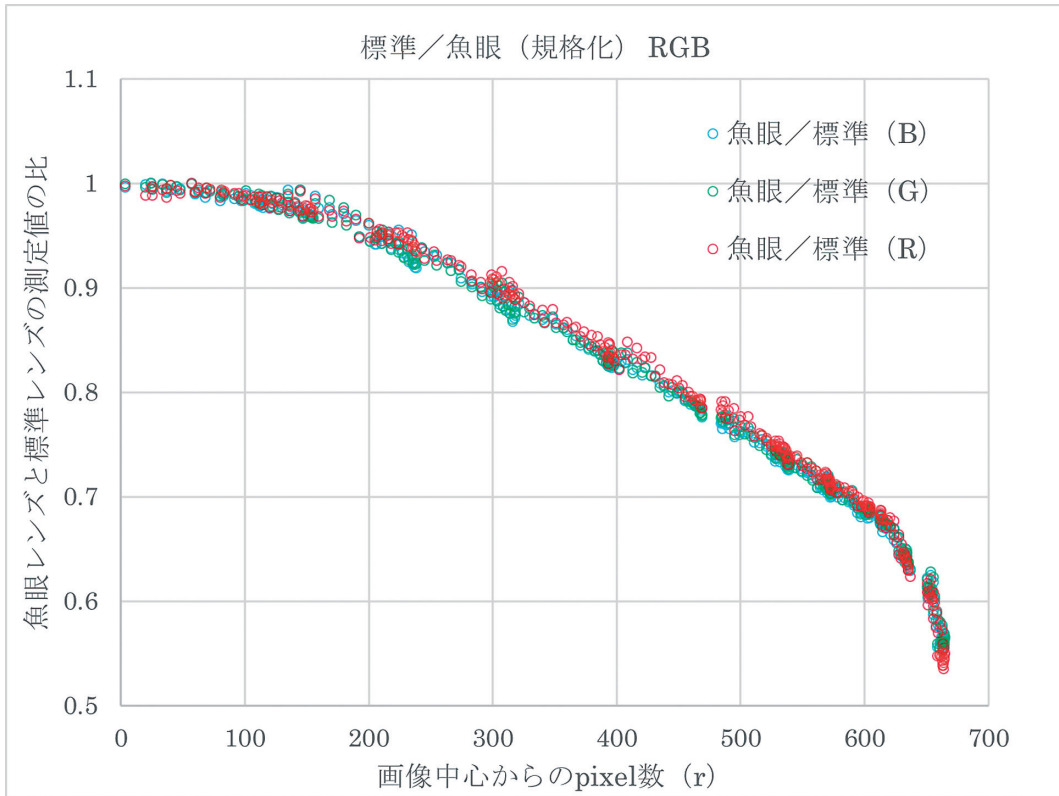


図7 画像中心からの距離と魚眼レンズと標準レンズの各色の測定値の比率

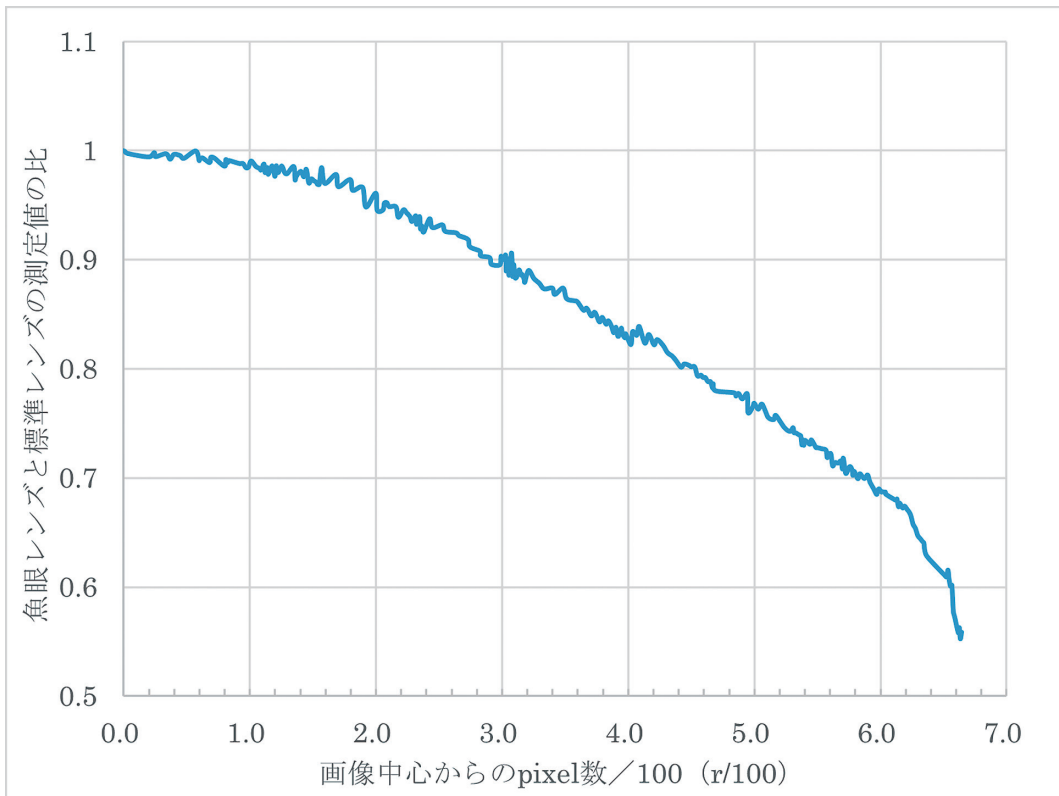


図8 画像中心からの距離と魚眼レンズと標準レンズの各色の測定値の比率



図9 恒星撮影時の標準レンズの撮影範囲と測光対象の恒星



図10 魚眼レンズで夜空を撮影した様子

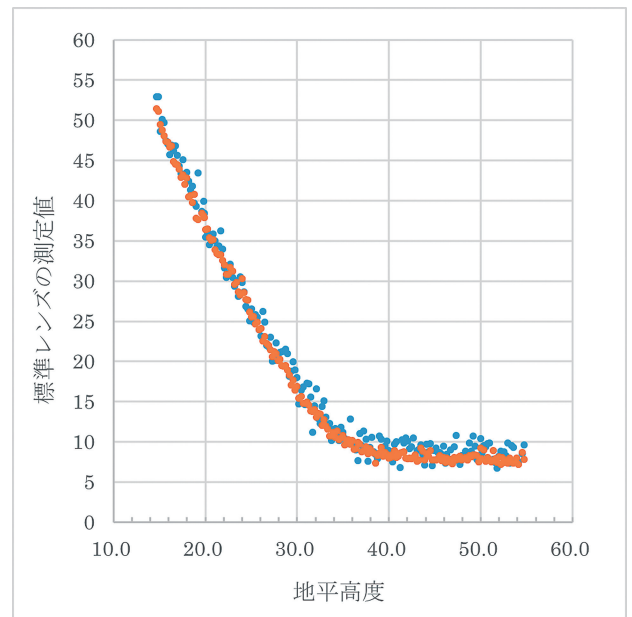


図11 η Leo 周辺の夜空の明るさ
(青: Sky幅 2pixel, 赤: Sky幅 12pix)

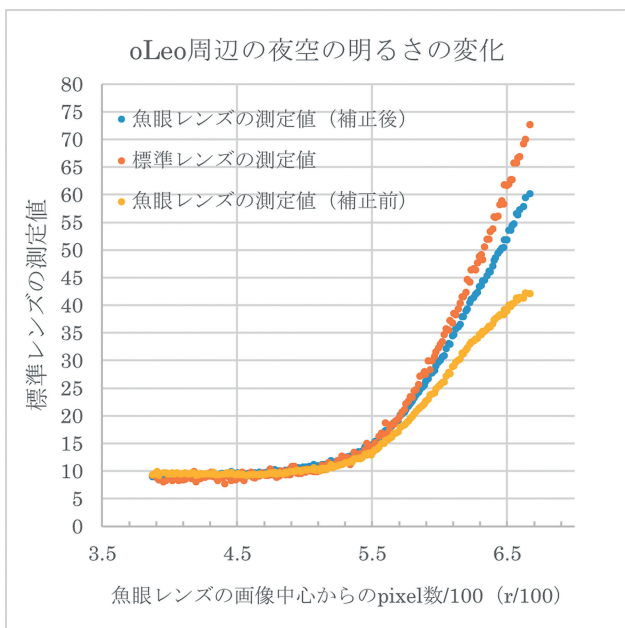
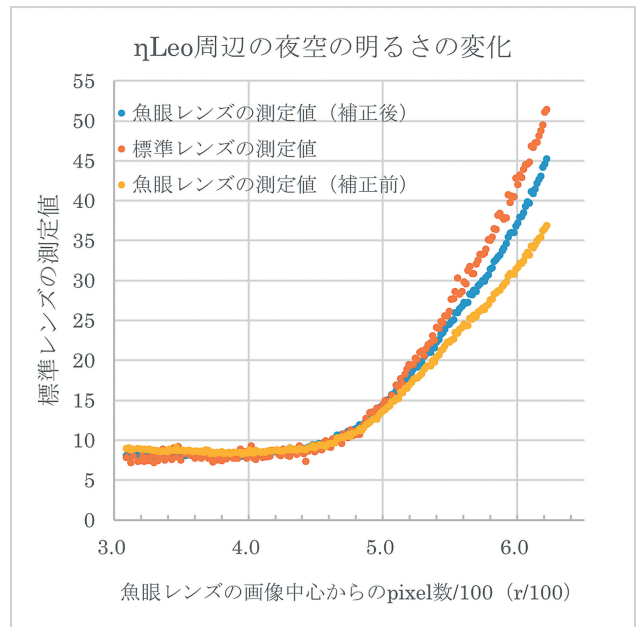
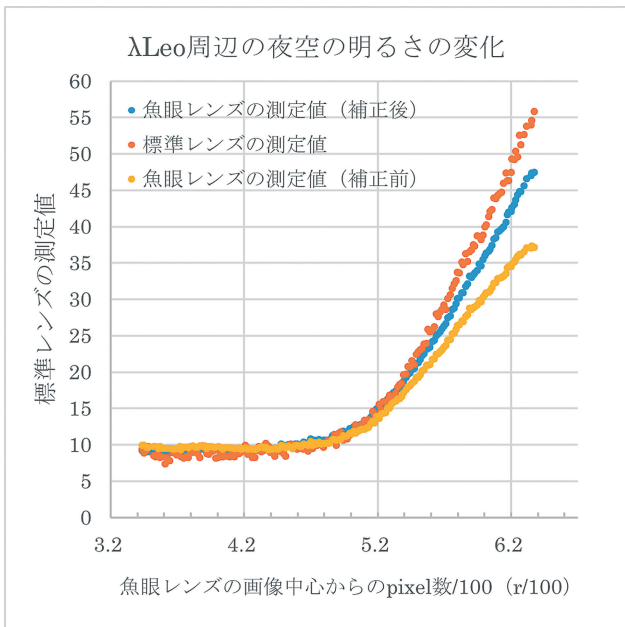
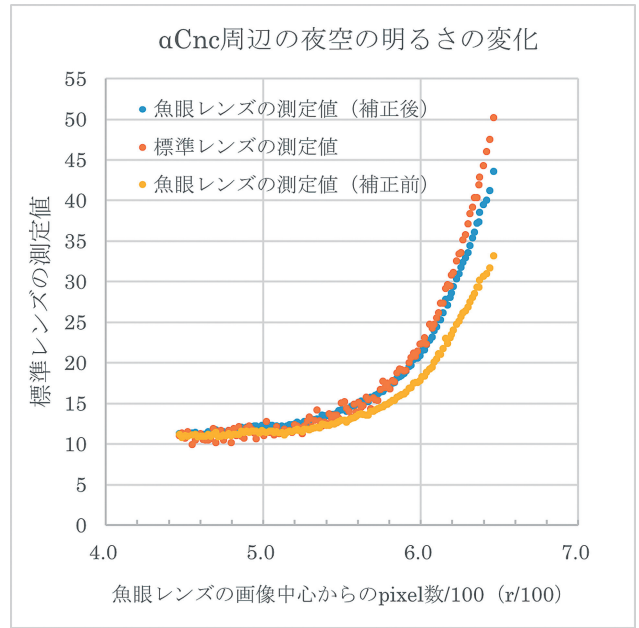
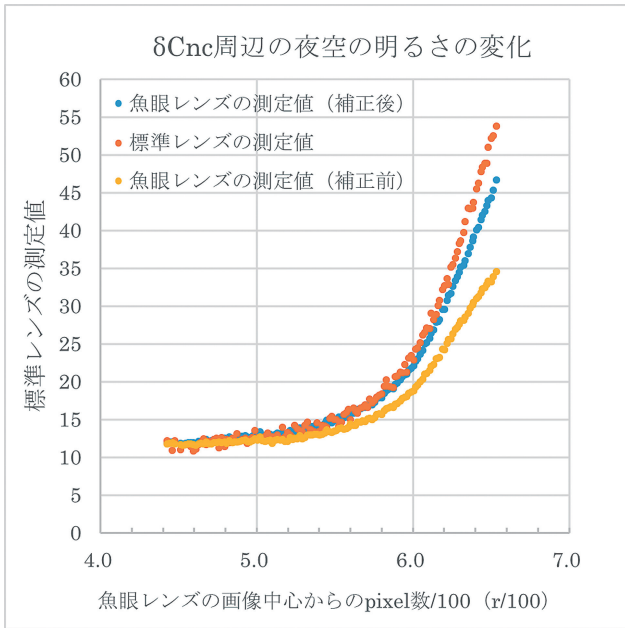


図12 各恒星の周囲の夜空の明るさについて補正後の魚眼レンズでの測定値と標準レンズでの測定値との比較

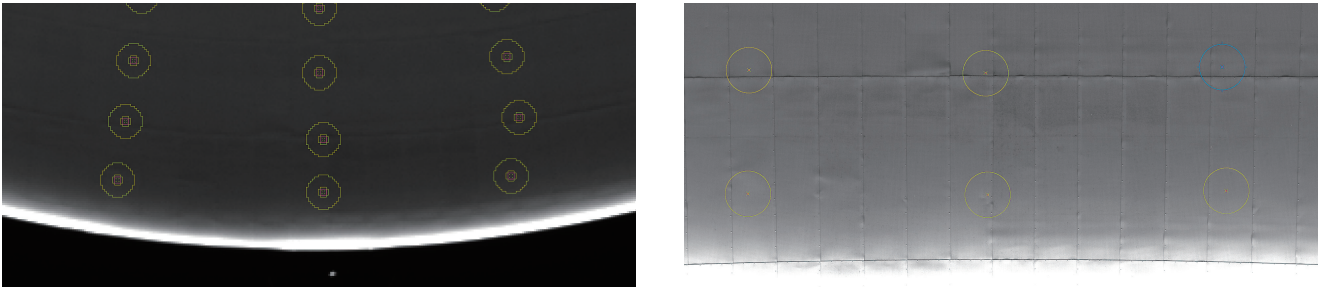


図13 ドームの縁に近い部分の測光範囲の比較 (左: 魚眼レンズ, 右: 標準レンズ)

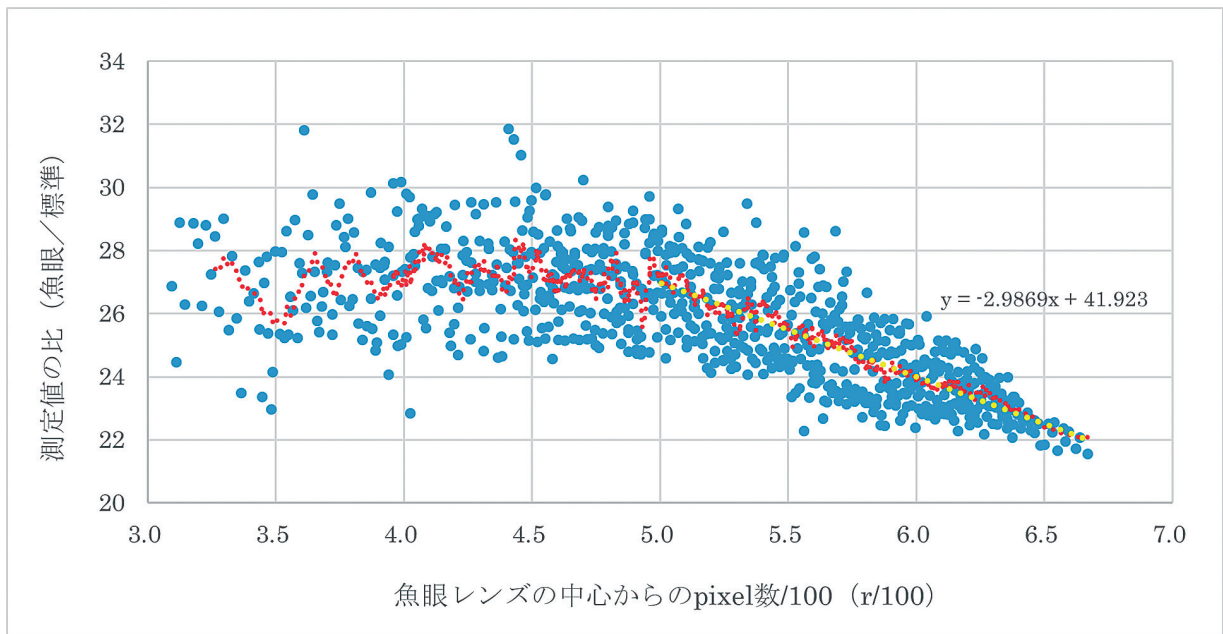


図14 夜空の明るさの魚眼レンズと標準レンズでの測定値の比 (補正後). 赤点線は10区間移動平均. 黄色の直線は, $r > 5$ の範囲の近似直線.

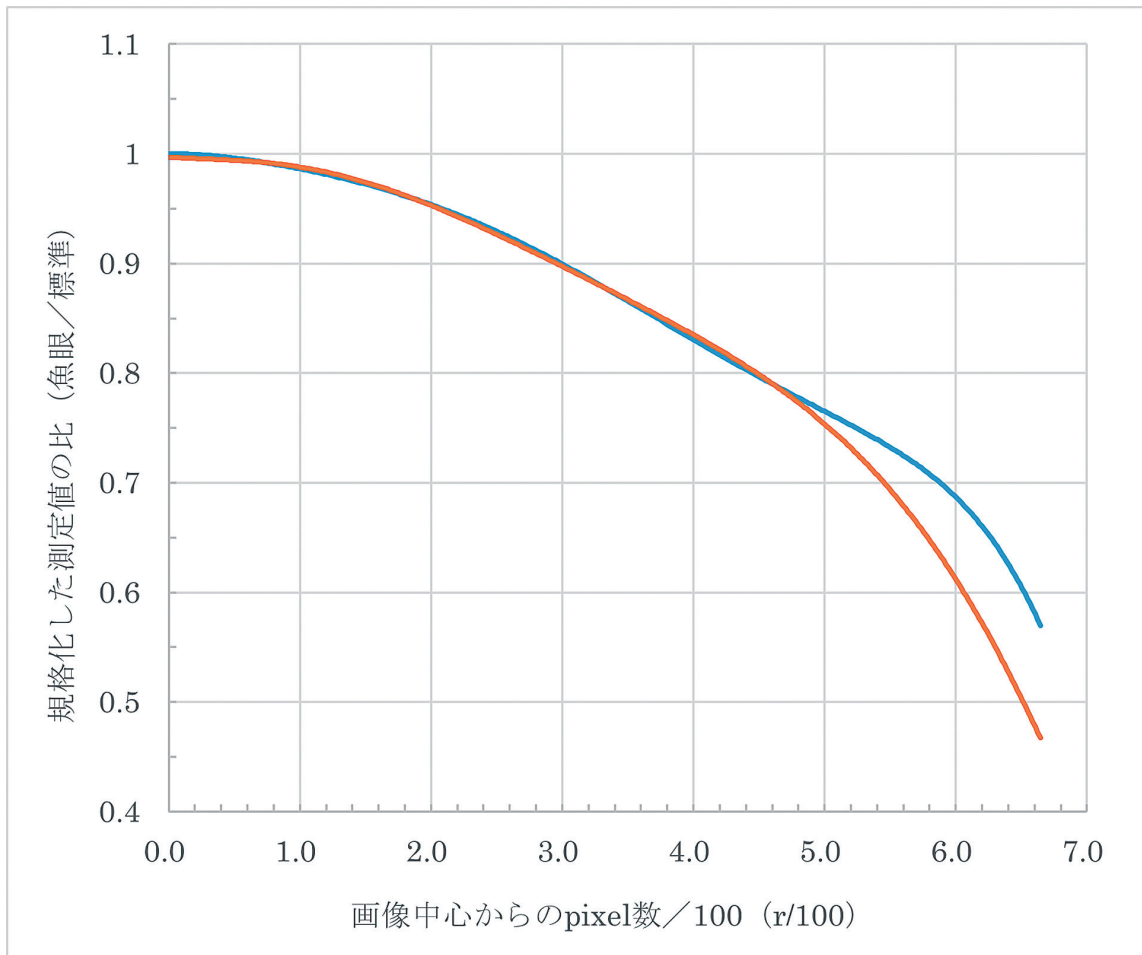


図15 魚眼レンズの周辺減光を近似する曲線（青：校正前，赤：校正後）

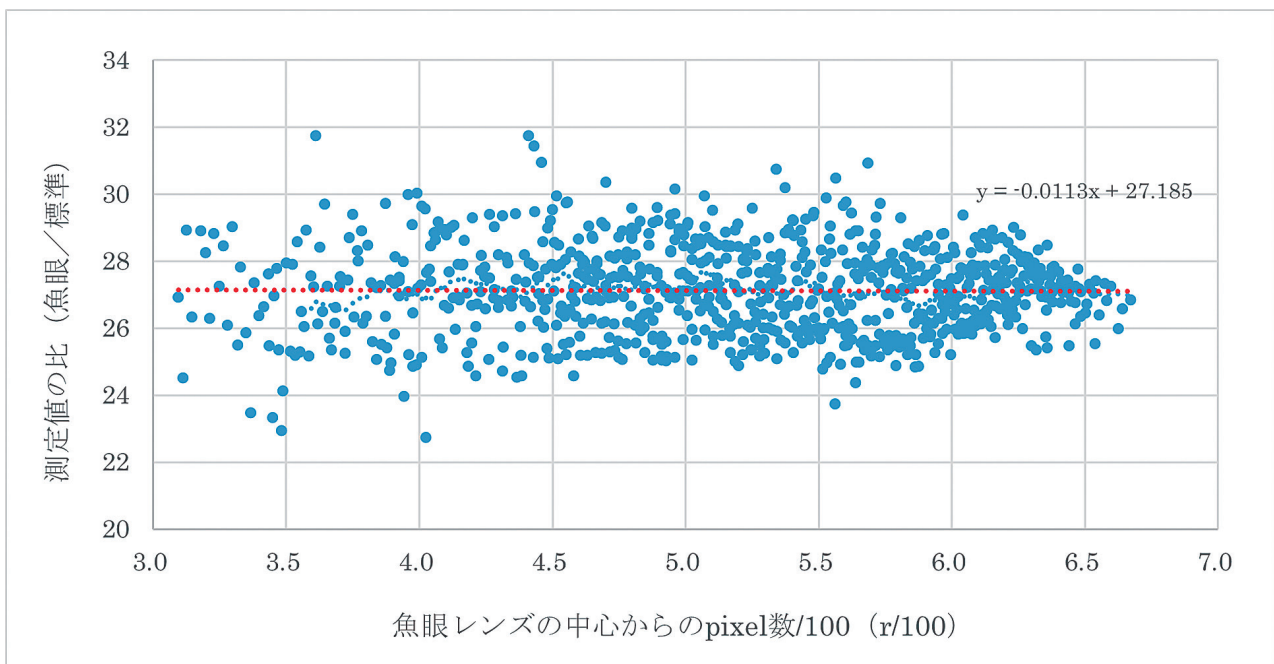


図16 夜空の明るさの魚眼レンズと標準レンズでの測定値の比（校正後）．赤点線は近似直線

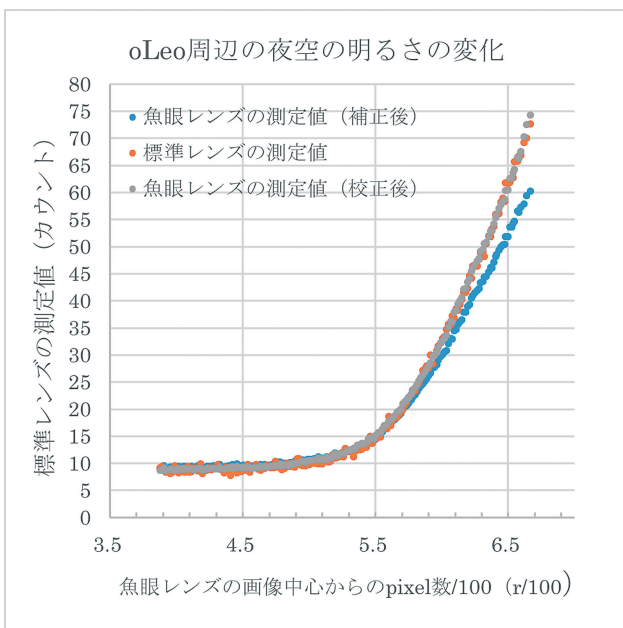
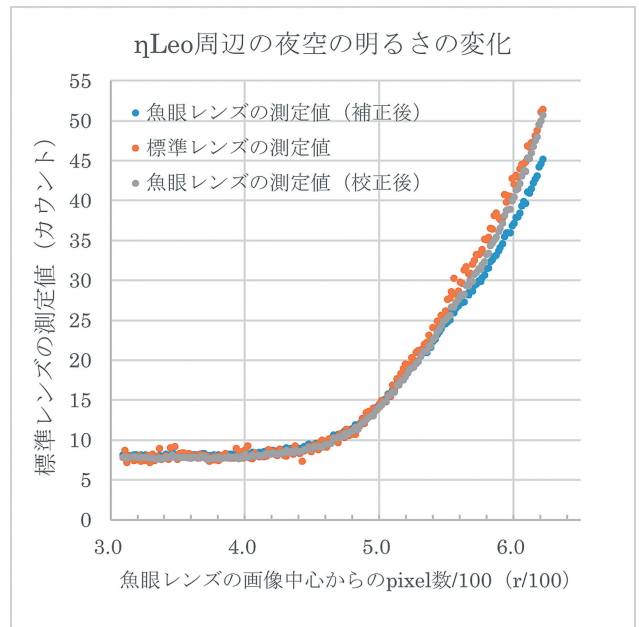
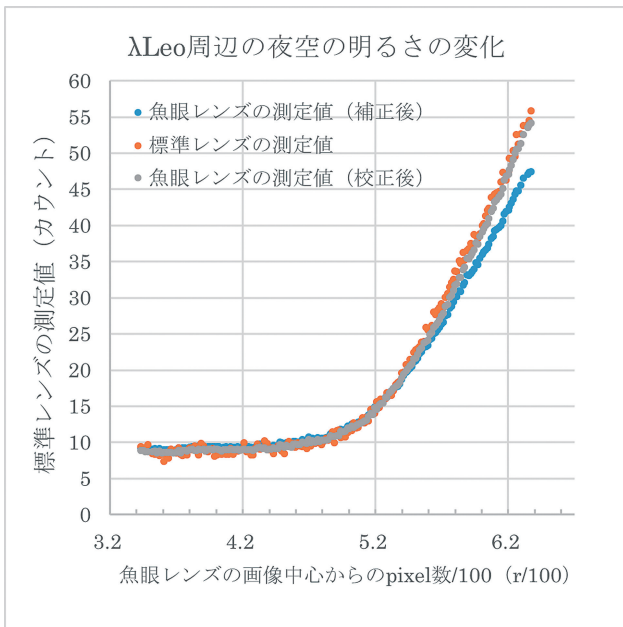
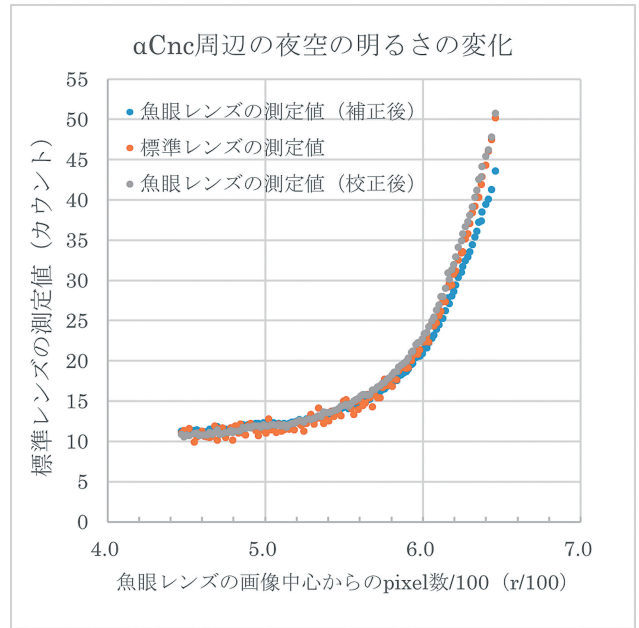
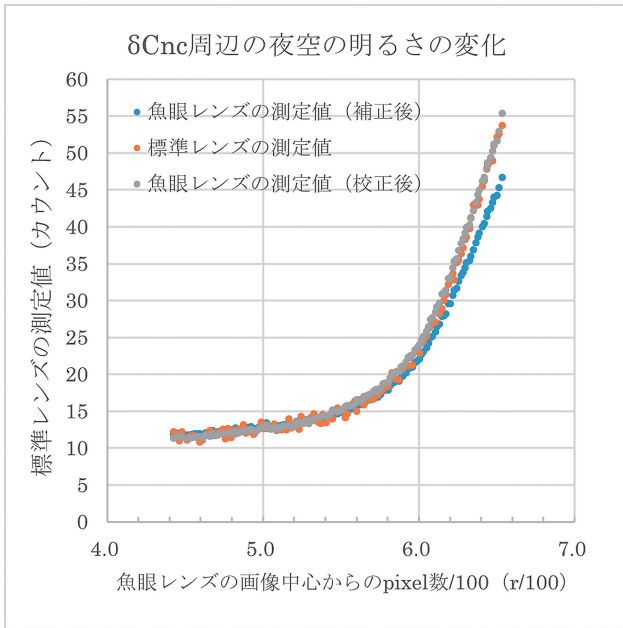


図 17 各恒星の周囲の夜空の明るさについて校正後の魚眼レンズでの測定値と標準レンズでの測定値との比較

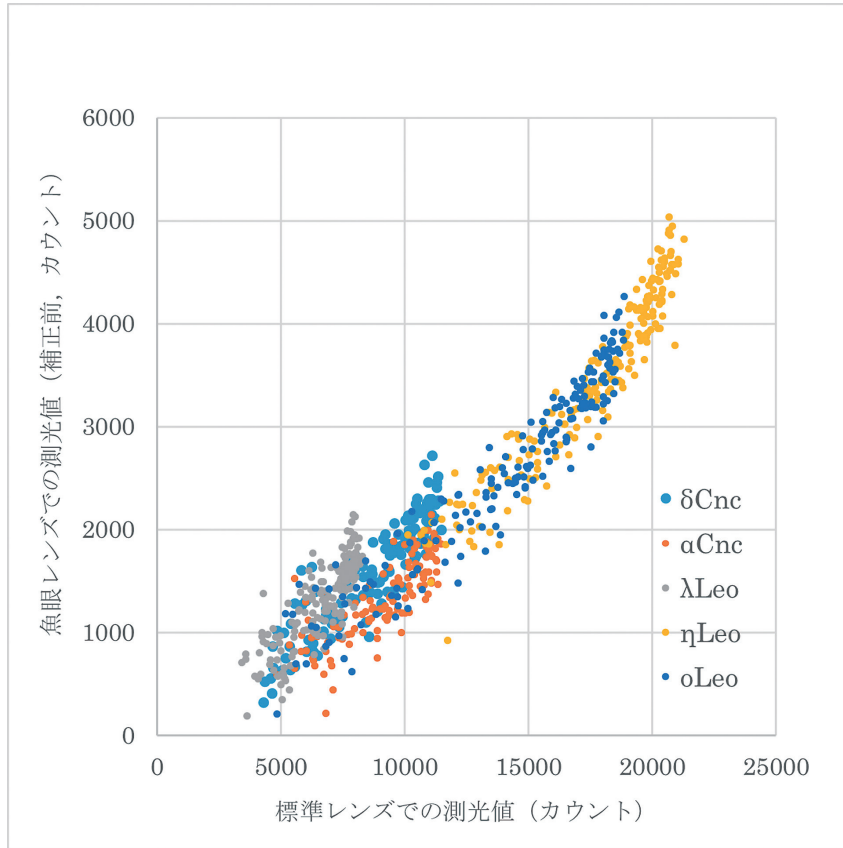


図 18 各恒星の標準レンズ魚眼レンズの補正前の測光値の比較

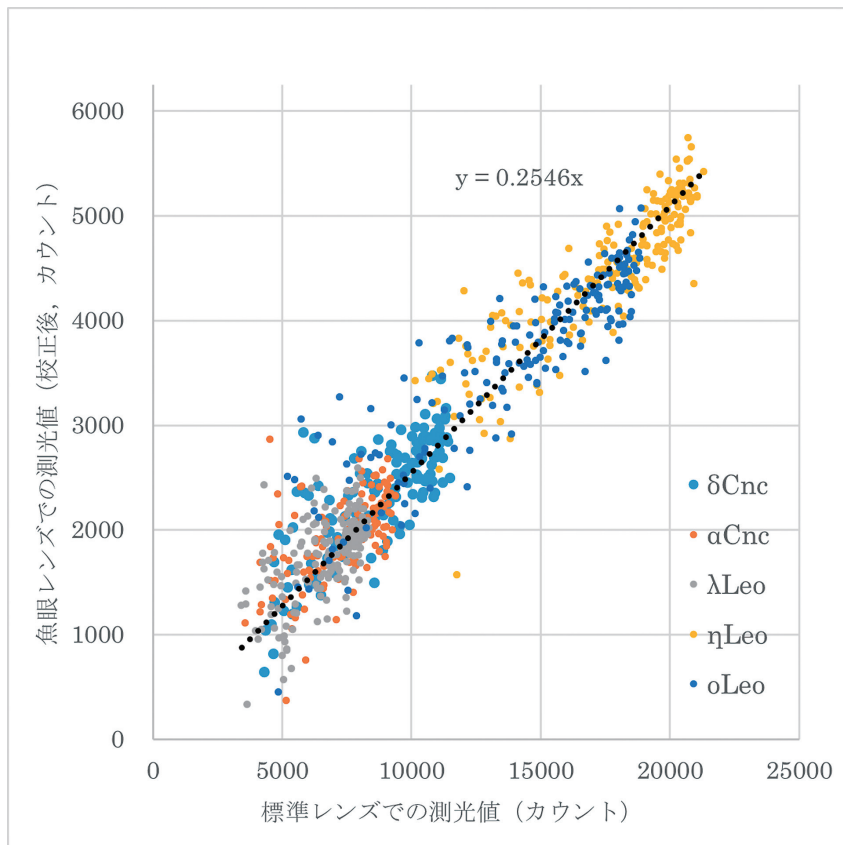


図 19 各恒星の標準レンズ魚眼レンズの校正後の測光値の比較

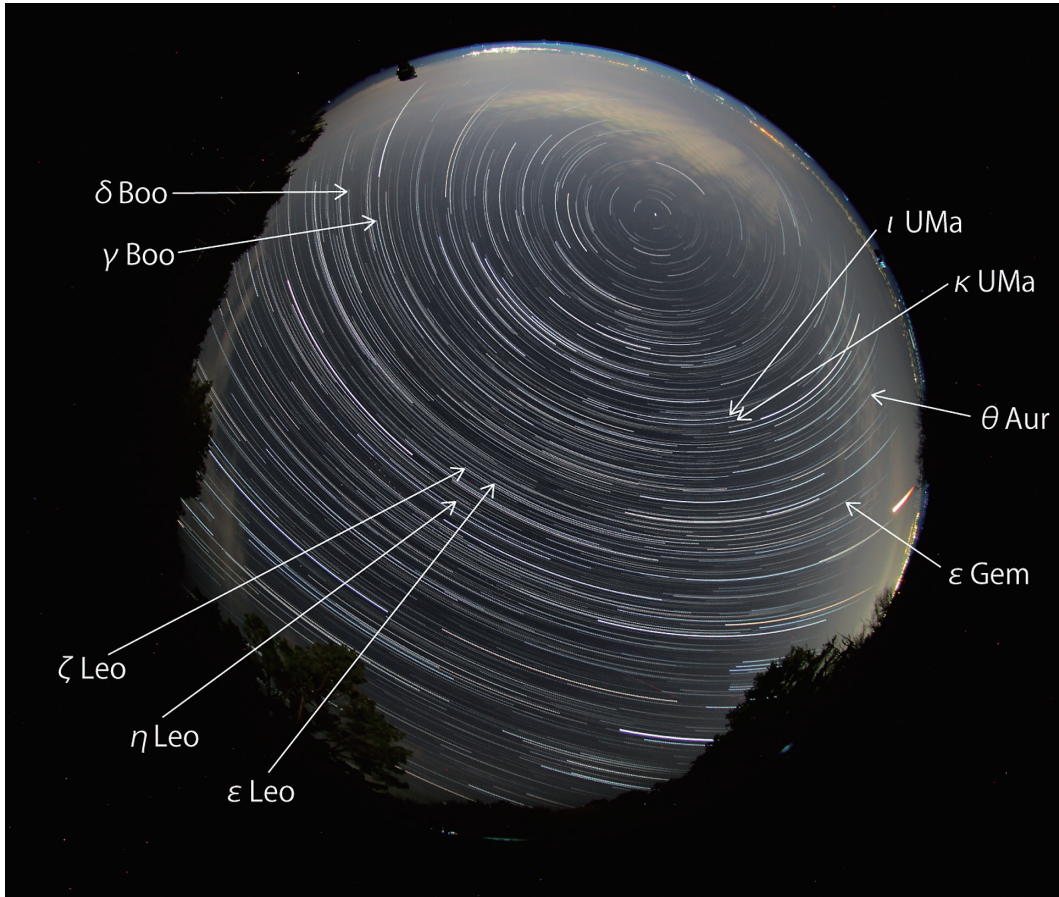


図 20 大気減光係数を測定するために使用した恒星が移動した軌跡

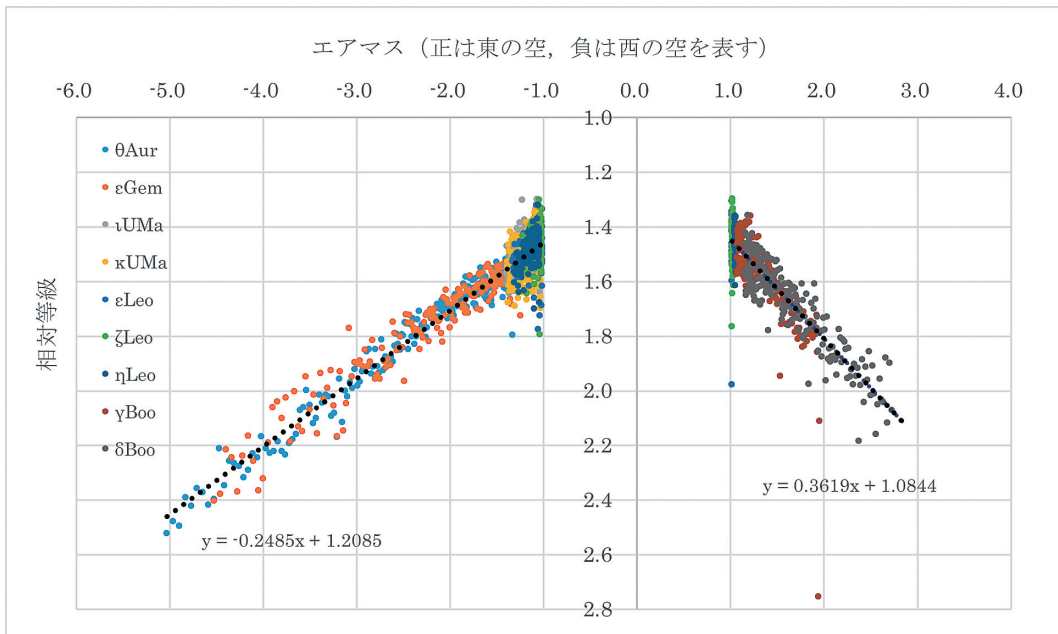


図 21 エアマスによる恒星の等級の変化. エアマス 1 は天頂方向の大気量に相当し, 図中で正の値は東の空, 負の値は西の空を表している.