

超広視界双眼鏡 WX の開発

富田賢典*, 福本 哲*

Development of the super-wide field of view WX binoculars

Katsunori TOMITA* and Satoshi FUKUMOTO*

世界最高峰の双眼鏡の製品化を掲げ、かつてないレベルの広視界と周辺までクリアな像を両立、超高性能な光学系を双眼鏡としての大きさ・重さで実現することを目標とし、2機種の双眼鏡（WX 7×50 IF・WX 10×50 IF）を開発した。それぞれの双眼鏡の見掛視界は、66.6°と76.4°である。

一般的に、上記のような非常に広視界で、且つメガネをかけたままでも視界の隅々まで覗きやすいロングアイレリーフの仕様を満足するように双眼鏡を設計した場合、プリズムや接眼レンズが双眼鏡の幅方向に大型化し、双眼鏡の眼幅の確保が困難であった。本双眼鏡では、プリズムにアッペ・ケーニッヒ型を採用し、プリズムが幅方向に大型化することを抑えた。また、新タイプの接眼レンズでパワー配置など最適なバランスを導き出し、接眼レンズの径の増大を防ぎ、眼幅を確保した。さらに、視界の最周辺まで十分に収差を追い込み、超広視界であるにもかかわらず像が平坦でシャープな視界を実現した。

本双眼鏡は2017年6月に発売した。その後、性能を妥協なく追求した製品として、高い評価を得ている。

The purpose of this development is to produce one of the best binoculars in the world. We made two types of binoculars that had unprecedented super-wide field of view (FOV) with sharp images up to the edge by correcting aberrations. The products specifications are 7 x 50 and 10 x 50. Each apparent FOV is 66.6° and 76.4°. Consequently, we achieved target performances and launched these products in 2017. After commercialization, the binoculars are highly regarded for its excellent performance.

Key words 双眼鏡, 超広視界, 接眼レンズ, プリズム
binoculars, super-wide field of view, eyepiece, prism

1 はじめに

今回、10年以上かけて開発を進め、製品化した双眼鏡のWXシリーズを紹介する。ラインアップは2種類あり、実視界が広く、明るい視界が得られるWX 7×50 IFと、見掛視界が広く、開放的で迫力を感じられるWX 10×50 IFである。このシリーズは、これまでにない世界最高峰の双眼鏡を製品化することを目標に掲げ、開発された。天体観察愛好家などの星空を長時間観察したいという要望や、船舶や監視などの業務用、観光地での風景観察といった目的でも、現存する双眼鏡では見え味、視界の広さに満足できないユーザーの要望にも応えられることを狙った。

従来、このような超広視界の双眼鏡の設計を試みた場合、プリズムや接眼レンズといった光学部品の大型化などの問題が生じたため、双眼鏡として成立させるのは困難だった。これらの問題を乗り越えた結果、かつてないレベルの広視界と周辺までクリアな像を両立し、超高性能な光学系を、双眼鏡としての大きさ・重さで実現することを可能にした。

この製品は、弊社の創立100周年となる2017年6月に、発



Fig. 1 本双眼鏡の図

売され、その後、高い性能が評価され、予想を超える売り上げを上げている (Fig. 1)。

2 主な仕様

Table 1 に本双眼鏡の主な仕様を示す。

本製品の特徴である視界の広さを従来の双眼鏡と比較したイメージがFig. 2, Fig. 3である（視界のイメージはおうし座のV字部分）。

* 光学本部 第一設計部

Table 1 本双眼鏡の主な仕様

	WX 7×50 IF	WX 10×50 IF
倍率	7	10
対物レンズ有効径 [mm]	50	50
実視界 [°]	10.7	9
見掛視界 [°] *1	66.6	76.4
ひとみ径 [mm]	7.1	5
アイレリーフ [mm]	17.7	15.3

*1: ISO14132-1:2002に基づいた見掛視界の表記数値.

7x50 SP WP



実視界 : 7.3°
見掛視界 : 48.1°

WX 7x50 IF



実視界 : 10.7°
見掛視界 : 66.6°

Fig. 2 従来品と WX 7 x 50 IF の視界の広さを比較したイメージ

10x70 SP WP



実視界 : 5.1°
見掛視界 : 48.0°

WX 10x50 IF



実視界 : 9.0°
見掛視界 : 76.4°

Fig. 3 従来品と WX 10 x 50 IF の視界の広さを比較したイメージ

Fig. 2 左側は、弊社で30年以上前に発売され、現在も天文ファンに人気の高い高性能双眼鏡 7×50 SP WP の視界のイメージである。WX 7×50 IF の視界のイメージを右側に並べると 7×50 SP WP と比べて、圧倒的に視界が広いことが分かる。

Fig. 3 左側は、7×50 SP WP と同様に以前から人気の高い高性能双眼鏡 10×70 SP WP の視界のイメージである。WX 10×50 IF の視界のイメージを右側に並べると視界が著しく広がっていることが分かる。

WX シリーズの 2 機種には、それぞれ長所があり、目的に合わせて選択することができる。

WX 7×50 IF は、ひとみ径が 7 mm と大きく、双眼鏡を

通しているにもかかわらず、視界が非常に明るい。そのため星雲などの面積のある淡い天体を、より明るく見る場合に適している。また、7 倍の双眼鏡では他に類を見ないほど視界が広い。

WX 10×50 IF のひとみ径は、WX 7×50 IF よりも小さい 5 mm だが、倍率が高いため夜空のバックグラウンドが暗くなり、恒星などの点光源の天体をより高いコントラストで見ることができる。また、見掛視界が 76.4° と他の双眼鏡と比べて圧倒的に広く、没入感をより楽しむことができる。

両機種ともにアイレリーフは、眼鏡をかけた人でも覗きやすいロングアイレリーフの仕様である。

3 光学設計

一般的に、超広視界で、ロングアイレリーフの仕様を実現するのは難しい。その理由は、プリズムや接眼レンズが双眼鏡の幅方向に大型化し、十分な眼幅調整範囲を確保することが困難であること、また、視界が広いため、最周辺まで像の平坦性を良好に保つことが難しいためである。本双眼鏡では、プリズムにアッペ・ケーニッヒ型を用い、また、新タイプの接眼レンズ¹⁾を設計することにより、眼幅調整範囲を確保し、さらに視界の最周辺まで収差性能を極めて良好に補正することに成功した。以下に、本双眼鏡の開発で特にポイントとなったアッペ・ケーニッヒ型プリズムと新タイプの接眼レンズの説明をする。

(1) アッペ・ケーニッヒ型プリズム

Fig. 4 は本双眼鏡で用いたプリズムの図である。

従来、多くの双眼鏡で用いられるプリズムは、ポロタイプのポロ I 型 (Fig. 5) やダハタイプのシュミット・ベシャン型 (Fig. 6) がある。ポロタイプのメリットは、製造が容易で、コスト面で有利となることだが、デメリットとして対物レンズと接眼レンズを一直線に並べた構成を取ることができず、双眼鏡が幅方向に大きな形状となり、コンパクトな形状にできないことが挙げられる。そのため今回は、ボディの形状が直線的な形にまとめられるダハタイプを採用した。しかし、ダハタイプでは、ダハ角 90 度に対して、



Fig. 4 本双眼鏡で用いたプリズムの図

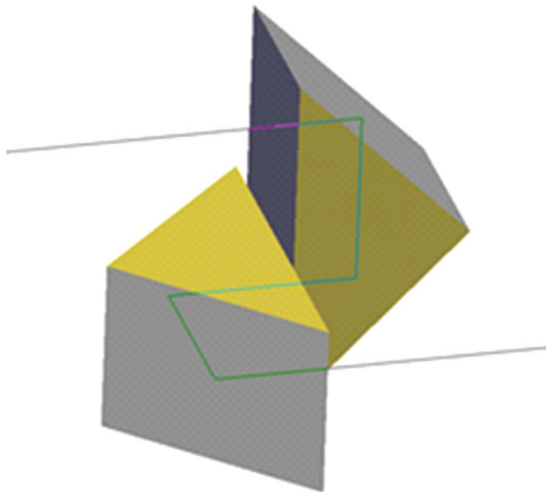


Fig. 5 ポロ I 型

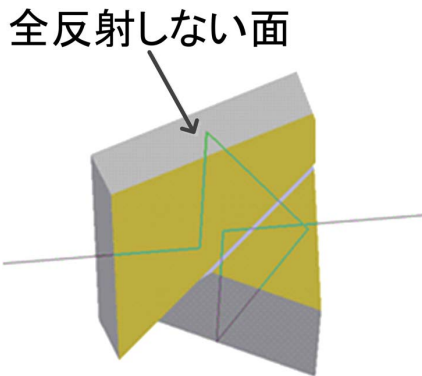


Fig. 6 シュミット・ベシャン型

秒単位の公差が付けられるなど、高い精度が必要となり、製造が難しく、コストも高くなるというデメリットがある。

ダハタイプの中で多用されるシュミット・ベシャン型は、光路を折り畳むため全長の短縮効果が高く双眼鏡を短くできる。しかし、プリズム内の光路長は長くなるため、大口径や広視界の双眼鏡で用いると光束が蹴られやすくなる。そのため、光束を通すには有効径を大きくしてプリズムの幅を大型化する必要がある。大口径や広視界の双眼鏡には不向きである。また、反射面の中で全反射しない面が1面存在し、その面では蒸着面での反射となり光量をロスする。

本双眼鏡は大口径且つ広視界のため、シュミット・ベシャン型を用いると、プリズムが幅方向に大型化する。そこで、ダハタイプでありながら光路長が短いアッペ・ケーニヒ型を採用した (Fig. 7)。シュミット・ベシャン型とアッペ・ケーニヒ型の光路長を、プリズムを平行平板に展開して比較したイメージを Fig. 8 に示す。アッペ・ケーニヒ型は、全長の短縮効果はほぼないが、光路長を短くできることにより、プリズムの有効径を小さくすることが可能で、プリズムが幅方向に大型化することを抑えられ、また、すべての反射面で全反射するので、光量のロスが無い。

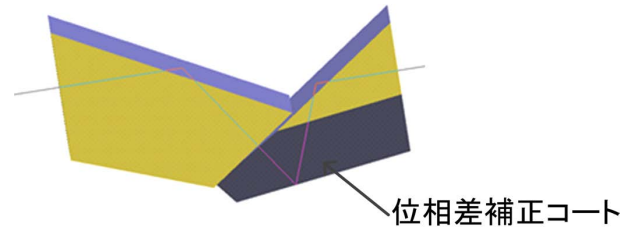


Fig. 7 アッペ・ケーニヒ型

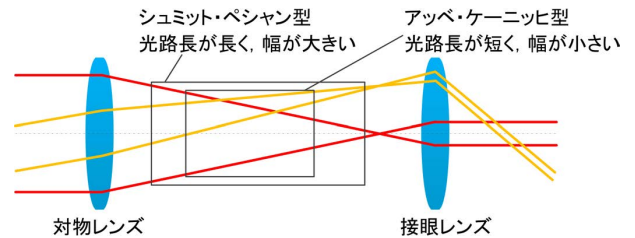


Fig. 8 プリズムを平行平板に展開した場合の光路長の比較

ダハタイプのプリズムでは、光がダハ面で反射する際に、光束がダハの稜線で左右に分断されて、それぞれの偏光状態が異なってしまうという問題が生じる。それにより分解力の低下、コントラストの劣化が起こる。今回用いたプリズムでは、ダハ面に位相差補正コートを施してこの現象を改善している。

(2) 新タイプの接眼レンズ

双眼鏡の光学系は、対物レンズ側は画角が小さく、明るさの影響が支配的で、接眼レンズ側は画角の大きさが支配的となる。今回の双眼鏡は超広視界のため、接眼レンズ側で、画角に対して影響の大きい収差の補正が重要であった。

今回設計する上で多くの制約があったが、特に障壁となった条件の一つに接眼レンズ径がある。双眼鏡の接眼レンズの外径は人間の左右の眼幅以上に大きくすることができない。Fig. 9 で示すように人間の両目の間隔が決まっています、接眼レンズ径を大きくしていくと左右の接眼レンズが干渉してしまう。接眼レンズ径に制約があると、光学設計をする上で次のような問題点が生じてくる。

非常に広視界でなおかつロングアイレリーフの接眼レンズを実現しようとした場合、最大画角の光線の角度が、仕様でほぼ決まっているため、必然的に接眼レンズの径が大きくなる (Fig. 10)。

双眼鏡の光学系で、収差補正やアイレリーフを伸ばすのに優れている接眼レンズのタイプに、中タイプがある (Fig. 11)。中タイプとは、弊社で用いている用語で、一般的ではないが、中間像の前に負のパワーのレンズを配置したタイプである。この負のパワーのレンズを中レンズ、中間像よりも眼に近いレンズを外レンズと呼んでいる。基本的にケプラー型の望遠鏡は、焦点距離が正のパワーのレンズで構成されているために、ベッツパールの補正が難しい。中タイプを用いると、負のパワーのレンズにより、像面の補

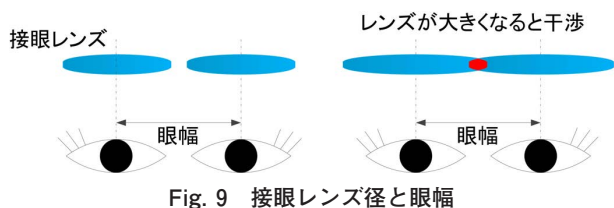


Fig. 9 接眼レンズ径と眼幅

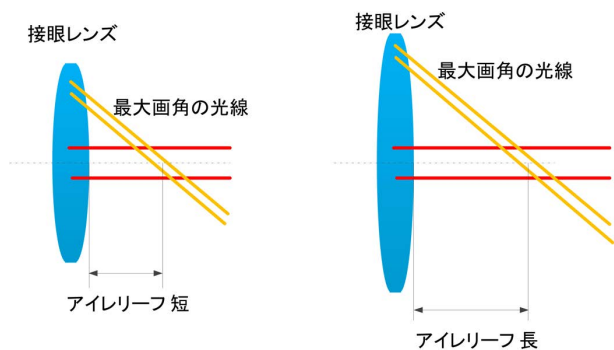


Fig. 10 接眼レンズ径とアイレリーフ

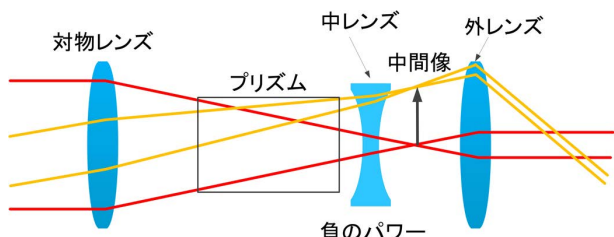


Fig. 11 中タイプの接眼レンズの構成

正に非常に有効に働く。また、中レンズで光線を跳ね上げることで、アイレリーフを伸ばすのに有利である。このタイプは、光線を跳ね上げることで接眼レンズの径が大きくなってしまふデメリットがある。そのため、中レンズの焦点距離を適切に管理した設計が重要である。

双眼鏡の光学系は、一般的にビネッティングが大きく、周辺光束が非常に細くなっていることが多い。アイポイント位置に眼を置けば全視界が見えるが、周辺光束が細いと眼が動いたときにブラックアウトしやすくなる。特に広視界の双眼鏡の場合、眼が動いた時に周辺がすぐに見えなくなってしまう。そのため、今回の双眼鏡は、周辺光束を可能な限り太く取り込むように設計した。周辺光束を太くするには、接眼レンズ径が大きいと有利だが、上記の通り接眼レンズ径には制約がある。

広視界の双眼鏡では、瞳の球面収差の影響が問題となりやすい。瞳の球面収差により、画角によってアイポイント位置が変わってしまうことで、眼を置く位置によって視界の一部が欠けてしまったり、全視界を欠けることなく見える位置がないといった現象が起こる。Fig. 12 に瞳の球面収差によって視界が欠けてしまう例を示す。Fig. 12 で示すように眼の位置を決めた場合、視界の中心の光線や視界の周辺の光線は眼に入るが、中間の画角の光線は眼に入らず、

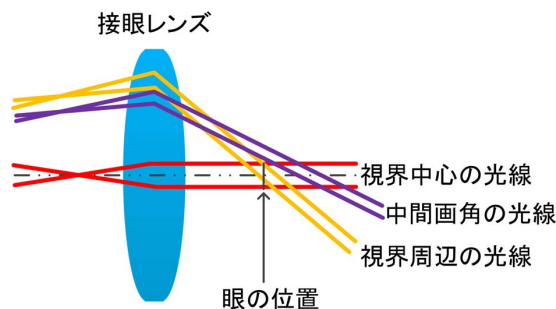


Fig. 12 瞳の球面収差による視界の欠け

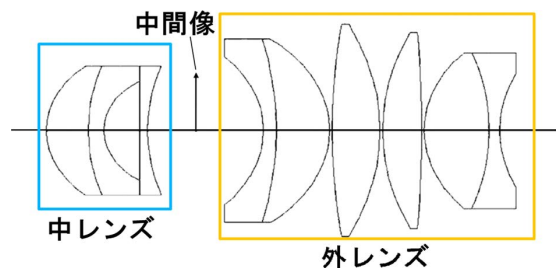


Fig. 13 接眼レンズの構成の例

視界が欠けてしまうことになる。視界の欠け方が隠元豆のように見えることから、隠元豆効果と呼ばれる²⁾。隠元豆効果を防ぐために、設計時には瞳の球面収差の値を確認する必要がある。

その他に、広視界の双眼鏡では、あえて適度な歪曲収差を出して設計するという特徴がある。双眼鏡を左右に振って観察した際に、歪曲収差が小さいと物体が球面上を移動するように不自然に見えてしまう。これにより、観察者に船酔いのような症状が生じる。この現象は視界の広い双眼鏡ほど顕著となるが、適度な糸巻型の歪曲収差を出すことで緩和される。そのため、今回の双眼鏡では、歪曲収差の狙い値を定めて、意図的に歪曲収差を出した設計とした。

設計した接眼レンズの構成の例を Fig. 13 に示す。

中タイプを採用し、中間像の左側に負のパワーのレンズ系を配置した。設計の特徴として、中レンズも外レンズもレンズ枚数の多い構成で、収差補正に有利である。各レンズのパワー配置など最適なバランスを導き出し、接眼レンズの全長を抑えて光軸方向でのプリズムとの干渉を防いでいる。一般的な双眼鏡の中タイプでは、中レンズが単レンズもしくはダブルレット1つのことが多いが、今回は2つに分割することで、強力に像の平坦性に効果を発揮している。中レンズの最も左側の面が、強い凸面の形状をしているが、その凸面で一度光線を下げて、接眼レンズ径を小さくする働きをしている。接眼レンズ径の大型化を抑えることで、十分な眼幅調整範囲を確保した。3つの貼り合せレンズは、色収差の補正に役立っている。曲率の強い凹面を数か所配置することにより、像面の平坦性を補正している。視界の周辺まで十分に収差を追い込み、超広視界であるにもかかわらず、最周辺まで像が平坦でシャープな視界を実現した。

4 光学性能

設計時、光学性能の詳細な評価は、収差図等を確認しながら行っているが、参考までに2次元像シミュレーションの結果を示す (Fig. 14, Fig. 15)。2次元像シミュレーションで基にした画像は、黒の背景に白い丸をランダムに描いたものである。比較のために、従来の双眼鏡と本双眼鏡の視界周辺でのシミュレーション結果を並べた。

Fig. 14 左側は7×50 SP WP, Fig. 15 左側は10×50 SP WPの従来の双眼鏡のシミュレーション結果を示している。どちらも、光学性能は高いが、像が崩れてコントラストが落ちていることがわかる。それに対して、Fig. 14 右側のWX 7×50 IF, Fig. 15 右側のWX 10×50 IFのシミュレーション結果では、視界が圧倒的に広がっているにもかかわらず、周辺での光学性能が明らかによくなっていることが一目瞭然で分かる。

本双眼鏡は、従来の双眼鏡に対して視界の周辺でも、光学収差性能を良好に補正しているため、視界が圧倒的に広がっているにもかかわらず、十分に鮮明な像が得られる。

5 まとめ

かつてないレベルの広視界と周辺までクリアな像を両立、超高性能な光学系を双眼鏡としての大きさ・重さで2機種 of 双眼鏡 (WX 7×50 IF・WX 10×50 IF) を開発し、製品化を実現した。発売後、本製品は、性能を妥協なく追求した製品として、高い評価を得ている。発売当初は、光学性能に特化した製品で市場に受け入れられるか懸念があったが、期待を上回る売上げを上げている。

参 考 文 献

- 1) 株式会社ニコンビジョン, 双眼鏡及び接眼レンズ, WO2018/025768
- 2) 吉田正太郎:天文アマチュアのための新版 屈折望遠鏡 光学入門 (誠文堂新光社)

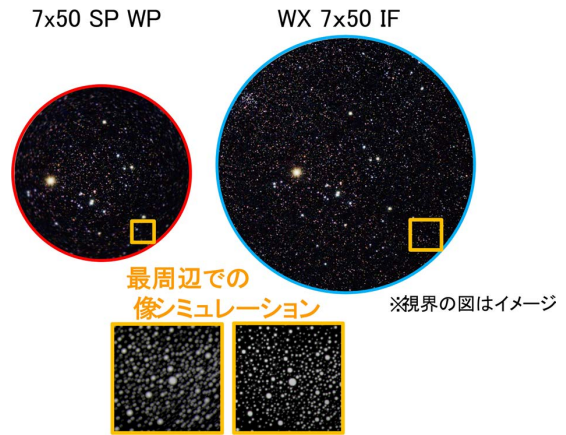


Fig. 14 従来品とWX 7 x 50 IFの光学性能の比較

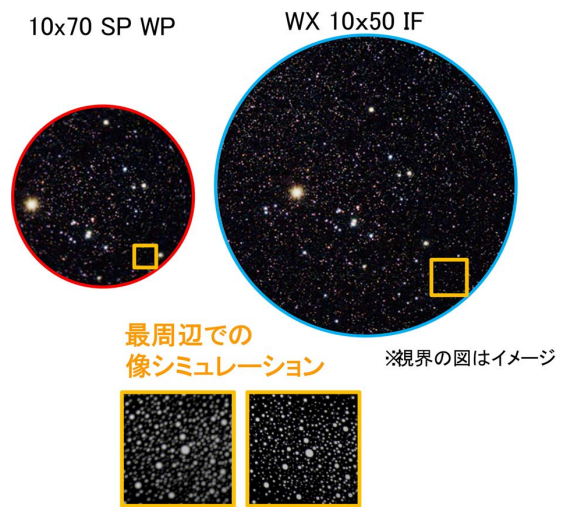


Fig. 15 従来品とWX 10 x 50 IFの光学性能の比較