

ニコン「NIKKOR Z 400mm f/2.8 TC VR S」 「NIKKOR Z 600mm f/4 TC VR S」の開発

猪原祐治, 山下雅史, 坂本祐輔

Development of the ‘NIKKOR Z 400mm f/2.8 TC VR S’ ‘NIKKOR Z 600mm f/4 TC VR S’

Yuji IHARA, Masashi YAMASHITA and Yusuke SAKAMOTO

ニコンの最先端技術を結集させ、高解像と美しいボケ味による臨場感あふれる描写力と高速・高精度オートフォーカスを備えた、テレコンバーター内蔵大口径超望遠レンズ「NIKKOR Z 400mm f/2.8 TC VR S」「NIKKOR Z 600mm f/4 TC VR S」をそれぞれ2022年2月、2022年11月に発売した。ここでは、上記2製品の様々な開発要素について説明する。

In 2022, we launched 2 super-telephoto prime lenses with built-in teleconverter, NIKKOR Z 400mm f/2.8 TC VR S and NIKKOR Z 600mm f/4 TC VR S. With cutting edge NIKKOR technologies, we provide photographers outstanding quality pictures that has high resolution and smooth bokeh. Furthermore, the newly developed high speed and high accurate VCM makes sure of that.

In this paper, we introduce some stories developing these lenses, technical features and backgrounds.

Key words ニコンZマウント、交換レンズ、超望遠レンズ、内蔵テレコンバーター、VCM
Nikon Z mount, interchangeable lens, super-telephoto lens, built-in teleconverter, VCM

1 はじめに

2022年に内蔵テレコンバーターを搭載したZマウント大口径超望遠レンズ「NIKKOR Z 400mm f/2.8 TC VR S」（以下Z400/2.8）、「NIKKOR Z 600mm f/4 TC VR S」（以下Z600/4）を発売した（Fig. 1）。Z400/2.8、Z600/4ともに、1.4倍の内蔵テレコンバーターを備えており、Z400/2.8は400mmと560mm、Z600/4は600mmと840mmの焦点距離を切り替えることが可能である。



Fig. 1 上：NIKKOR Z 400mm f/2.8 TC VR S
下：NIKKOR Z 600mm f/4 TC VR S

2 内蔵テレコンバーター搭載の背景

望遠レンズの使用において、焦点距離をより望遠側に伸ばすためにテレコンバーターを用いることはユースケースとして多い。その際に、汎用的な外付けテレコンバーターはレンズとカメラボディの間に挟む必要がある為、一度レンズとカメラボディを外す必要がある。この機材交換をしている間にシャッターチャンスを逃す恐れがある事、また荒天時の取り外しにおいてはレンズやカメラボディ内部へ水滴等が侵入しないよう、注意して作業する必要がある事などから、望遠レンズの内蔵テレコンバーター搭載はプロのフォトグラファーから強く要望をされている。このような背景から、ニコンでは2018年にFマウントのズームレンズ「AF-S NIKKOR 180-400mm f/4E TC1.4 FL ED VR」で内蔵テレコンバーターを採用したが、単焦点レンズへの搭載も望まれていた。

写真（Fig. 3）はZ400/2.8をZ9に装着し、手持ちで構えているフォトグラファーである。内蔵テレコンバーター切り替えスイッチはカメラグリップを持っている右手側に配されている（Fig. 2）。右手の中指で操作可能な場所に配置していることで、撮影姿勢を保ったまま内蔵テレコンバーターの使用、非使用を容易に切り替えることが可能である。

また、内蔵テレコンバーター使用時と非使用時でレンズ全長や重心なども変わらない為、フィールドでの撮影において内蔵テレコンバーター使用時も非使用時と同様の取り回しが可能というのも特徴の1つである。

機材の取り扱い時の利便性のみならず、性能面においても内蔵テレコンバーターは汎用テレコンバーターに対してアドバンテージがある。一般的な外付け汎用テレコンバーターはそのテレコンバーターが装着可能な何れのレンズにおいても性能を崩すことがないようにバランスを取り設計するケースが多いが、内蔵テレコンバーターは各機種専用での設計となっているため、設計性能を高める事が可能となる。それだけでなく、生産工程においてピント調整などの各種調整や、解像性能の検査なども内蔵テレコンバーター使用時、非使用時それぞれ行っている為、内蔵テレコンバーターの使用、不使用を問わず高画質な写真を撮影できる。



Fig. 2 内蔵テレコンバーター切り替えスイッチ



Fig. 3 Z400/2.8とZ9を用いた手持ち撮影

3 堅牢性と軽量化の両立

本2機種の開発において内蔵テレコンバーターの搭載と同様に重要視したもう一つの開発のテーマが、鏡筒の軽量化である。大口径超望遠レンズにとって軽量化されることは、撮影においても機材持ち運びにおいても大きなメリットとなる。Fマウントの現役機種である「AF-S NIKKOR 400mm f/2.8 FL ED VR」(以下 AF-S400/2.8)、

「AF-S NIKKOR 600mm f/4 FL ED VR」(以下 AF-S600/4)から、それぞれおよそ 850 g、550 g の軽量化を実現している。

軽量化を進めるにあたって、これまでニッコールレンズが培ってきた高い描写性能と堅牢性を有し、フォトグラファーに信頼されるカメラシステムであることは大前提であったため細心の注意を払う必要があった。

従来の鏡筒構造に対して構造自体の見直しや、部品点数の削減と合わせて部品そのものの軽量化も図っている。ここでポイントとなったのが、今までの開発および検証において蓄積してきた様々なデータを用いたシミュレーション技術である。これを活用して、部品の厚みと構造体としての強度、適した材料の選定を行い、軽量化と堅牢性を兼ね備えた製品を実現している。

例えば、部品を軽量化するためには、部品の体積を減らすか、密度を下げる必要がある。ただ部品の厚みを薄くすれば剛性が下がり、密度の低い材料を選べば、ヤング率が下がる。そこで、アルミ合金、マグネシウム合金、エンジニアリングプラスチックなど幾つかの素材を効果的に使い分けることで比重とヤング率のバランスをとることを試みた。その際に、シミュレーションでの強度解析を繰り返し行うことで、構造体の強度を保ちつつ、徹底的に無駄な厚みを排除している。

最終的には試作機での衝撃試験を行い、シミュレーションの確からしさを確認するとともに、ユーザーの手元で想定される必要強度の保証を行っている。こうした検討により、ニコン製品の大きな長所の一つである堅牢性、これまで培ってきた道具としての信頼感を維持したまま、大幅な軽量化を実現することができている。

4 テレコンバーター内蔵化、Zマウント化に伴う課題

今回のZマウントへのリニューアルにおいては光学設計もFマウントから大幅に刷新している。その理由は鏡筒全長を適切な長さに抑える事と、軽量化の2つに対応する為である。

内蔵テレコンバーターの搭載を実現するうえで、Zマウントの存在は有利な点不利な点どちらも併せ持っていた。有利な点としてはZマウントによってマウントの口径が大きくなったことで、内蔵テレコンバーターの搭載にあたって周辺光量を確保することが容易となった点である。

一方不利な点としてはショートフランジバックになったことによる鏡筒全長の増加である。鏡筒全長が伸びるという事は質量の増加を招くだけでなく、使用時の取り回しも悪化する。プロフォトグラファー向けのレンズやカメラボディなどの機材には非常に高価なものもあり、輸送時の紛失、盗難、損傷などはユーザーにとって心配の種である。そのため遠征時の移動において飛行機を利用する際は、機

内への手荷物として持ち込みをしたいというニーズが多い。この要望はより高価な超望遠レンズではなおさらである。したがってレンズの全長が手荷物として持ち込めるバッグに収まるサイズであることは強く求められている。

しかし、ただ鏡筒全長を短くするだけでは個々のレンズにパワーを持たせる必要があるため、逆に質量の増加や光学性能の低下を招くことになる。ここで、光学設計において最前面のレンズからセンサーまでの距離を光学全長、光学全長を焦点距離で割った値をテレ比と呼ぶが、テレ比が小さくなればなるほど、光線を収斂させるパワーに伴う収差発生量も増大する為、収差補正の難易度は高くなる。また、収斂パワーを増大させるためには、レンズの曲率半径を小さくする、レンズに使用するガラスの屈折率を上げるなどのアプローチがあるが、前者は体積が増加する方向になり、後者はガラスの比重が高いものになる傾向になるため、軽量化という観点でも不利な方向となる。

つまり「内蔵テレコンバーターを搭載しつつも」「大幅な軽量化を実現する」ことを、「鏡筒全長を抑え」「光学性能も維持／向上させる」ことを条件に達成する最適解を見極める必要があった。

5 カギとなった光学材料と設計のアプローチ

超望遠レンズにおいては色収差補正が設計性能を握るカギとなっている。色収差とは、レンズを通過した光の色（波長）ごとの結像位置がずれ、写真上で色がにじんで見える現象をいう。光学設計では様々な種類のガラスの凹レンズと凸レンズを組み合わせて色ごとの結像点を補正することを行っている。それぞれの時代においてExtra-low Dispersion (ED) ガラスや蛍石といった色収差補正に優れた素材を採用し、超望遠レンズの進化を図っている。

ED ガラスや蛍石といった素材が優れているのはその異常分散性による。可視域の光を取り扱うカメラレンズの設計において、異常分散性という主と主に青や紫などの短波長光線の振る舞いを指すが、ED ガラスや蛍石は一般的なガラスと比較してその振る舞いが異なる。それゆえ、異常分散性を有する素材を適切な箇所に用いることで赤から紫まで、つまり可視域全体において色収差を良好に補正することが可能となる。

さらに今回の設計では、ニコングループ独自開発の素材である Short-wavelength Refractive (SR) ガラスを採用した。SR ガラスも異常分散性を有する特殊なガラスである。従来の蛍石や ED レンズは分散が小さい領域で異常分散性を有した素材であったが、この SR レンズは分散が大きい領域で、青や紫といった波長の短い光を大きく屈折させるという特徴を持っており、蛍石や ED レンズと組み合わせることで可視域全域での色収差補正に大きく貢献している。さらに比重も軽いため、軽量かつ高性能という今回のテー

マに沿った設計には欠かせない素材である。

続いて、これらの素材を用いた具体的なアプローチ手順を説明する。従来の F マウントレンズでは最前面にほとんど屈折力を持たないレンズを配置していた。このレンズは後に続く蛍石を保護する役割を果たしていた。今回このレンズを凸レンズとし、レンズの最前方部分に蛍石を含めた 2 枚の凸レンズを採用する事で、保護ガラス+蛍石で構成していた時よりも発生する収差を低減させている。結果として、前方の 2 枚から大きく間隔をあけて後続レンズを配置することが可能となり、レンズ径を小型化でき、体積と質量の大幅な低減を実現している。一般的には、中間部のレンズ群を後方に下げることで収差は悪化するが、収差補正能力の高い SR レンズとスーパー ED レンズを後方部分に適切に配置することで前方での収差補正不足を補い、光学系全体として良好な収差バランスを実現している。

従来の F マウントレンズでは、フォーカシング時の収差変動を抑えるためにフォーカス群に 3 枚程度のレンズを使用していたが、フォーカス群より物体側のレンズ構成を最適化したことにより、より少ない枚数のフォーカス群でも近距離撮影時の収差変動を抑えることが可能となった。フォーカスレンズが軽量化できたことにより、フォーカスのアクチュエーターの設計自由度が増え、高速・高精度・静音駆動の実現への検討を進めることができた。

テレコンバーター内蔵の光学設計においては、光学系全体のみならず部分的なレンズ系での収差補正が重要となる。具体的には①テレコンバーターより物体側のレンズ系、②テレコンバーター部、③テレコンバーターよりカメラ側の 3 つの部分系に分けた際の①と②の 2 つの部分群である。テレコンバーターは焦点距離を拡大する際に、光学系の持つ収差も拡大してしまう。テレコンバーター使用時と非使用時の収差変動を抑えるためには、テレコンバーター非使用時に発生する①の収差量と、テレコンバーター使用時に発生する①の収差が②のテレコンバーターで倍率分拡大された収差量+②部分系の収差量の差を抑える必要がある。光学系全体としての収差、これら部分系の収差に注意しながら設計を進めることで、テレコンバーター使用時、非使用時問わず高い光学性能を実現している。

これまで述べた設計の結果を、実際の写真としてご覧いただきたい。

写真 (Fig. 4) は色のにじみが目立ちやすい水しぶきを含む被写体を、同じく 600mm の状態と、内蔵テレコンバーターを使用した 840mm の状態で撮影したものである。特殊ガラスで色収差をしっかり補正したことで、絞り開放から内蔵テレコンバーター使用、非使用にかかわらず水しぶきが透明に映っている。特に、撮影距離が 4~5 m と近い場合、色収差による色にじみが発生しやすいが、撮影距離に関わらずクリアな描写ができる点がフォトグラファーから好評であった。

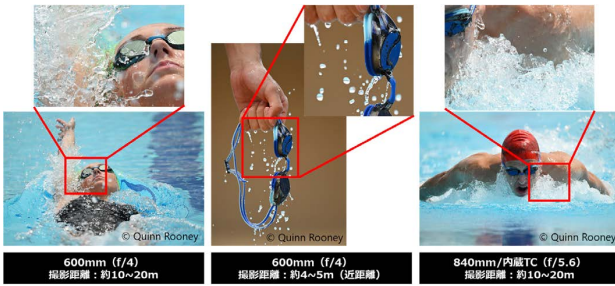


Fig. 4 色収差補正の効果

写真 (Fig. 5) は同じ被写体を 600mm の状態と、内蔵テレコンバーターを用いた 840mm の状態で撮影したものである。動物の体毛のような線の細かい被写体でも、絞り開放から 1 本 1 本細やかに描写しており、内蔵テレコンバーター使用、非使用にかかわらず高い解像感が得られていると実感いただけると思う。羊もハシビロコウも目の前にいるかのように錯覚させられる。この表現力が大口径超望遠レンズをついて撮影に持ち出したくなってしまふ魅力である。



Fig. 5 内蔵テレコンバーター使用時の画質

6 軽量化を支えた要素技術開発

設計と並行して、前方の大径レンズの質量の低減の為、大径レンズの薄肉加工の技術検討やその薄肉レンズを保持する技術検討も実施し、鏡筒質量の低減を図っている。

先に、超望遠レンズにおける設計時の色収差補正について述べたが、レンズ加工時や組立時にレンズ面の精度を保持することも、超望遠レンズのものづくりにおいては非常に重要なポイントとなる。レンズの研磨という観点では、そもそも大径レンズを精度よく加工すること自体が技術的に高難易度であることに加え、軽量化の為にレンズの厚みを薄くしたいという考えもあったため、さらに加工難易度を高めることになった。

また、このレンズをレンズ室に保持することにも課題があった。大径レンズはそれ自身の質量が大きい為、ユーザーが撮影現場でレンズを使用した際に、意図せず衝撃や振動を与えてしまったとしても性能を保てるようにするためには、適切にレンズを保持する機構と組み込み条件が必要となる。レンズが動いてしまわないように十分な力で保持する必要がある一方で、レンズに力をかけすぎるとレンズが歪み、加工時に出したレンズ面の精度を崩してしまうことになるため、光学性能の劣化を招いてしまう可能性が

ある。この信頼性と性能のバランスを見極めることが重要であった。

これらの検討を進めるにあたって、レンズ加工については軽量化および加工精度に関する目標を技術メンバーと設定し、加工実験結果のフィードバックをもらいながら性能と質量のバランスを確認しながら設計を進めた。レンズ保持については設計、製造、組立が協力し、シミュレーションと試作での確認を通じて、高い性能を維持しつつ信頼性を確保できる構造を採用している。

7 撮影チャンスを逃がさないオートフォーカス

スポーツや野生生物といった高速で動く被写体は、超望遠レンズの撮影シーンとして欠かせない存在である。超望遠レンズにはそうした被写体の一瞬を正確に切り取るためのオートフォーカス (以下 AF) 性能が求められる。一口に AF 性能といっても、そのアウトプットは様々な要素によって左右される。例えばサッカーの撮影において、細かいパス回しなどでボールが別のプレーヤーにわたった場合には、瞬時にピントを合わせられる瞬発力が必要になり、一人のプレーヤーがドリブルなどで相手選手をかかわすシーンをとらえるには、不規則な動きをとらえ続ける追従力が必要となる。

上記のようなニーズに合わせて本機種を設計するにあたり、フォーカスユニットは大きなブレイクスルーを必要としていた。大きなレンズをレスポンスよく駆動し、高精度に停止できるアクチュエーターを採用し、光学性能をより高く維持するために、フォーカス群のチルトを極力抑える機構が求められていたのである。様々な構成の設計検討と試作を経て、直接レンズ室に駆動力を与えることのできる VCM、ガタが少なく摩擦を抑えたガイド機構、高剛性のエンジニアリングプラスチックを採用したシルキースウィフト VCM が誕生したのである (Fig. 6)。

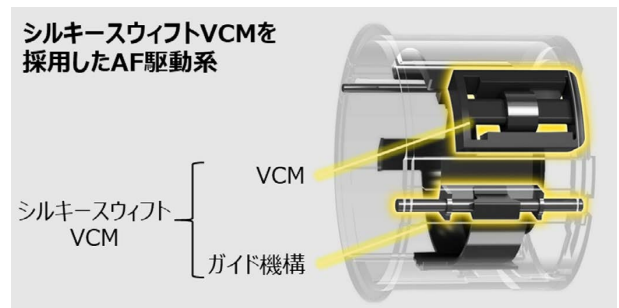


Fig. 6 シルキースウィフト VCM

さらにレンズ位置エンコーダーとして採用した光 ABS エンコーダーは、精密なスケールを光で読み出すことでレンズの位置を検出することにより、従来比約 20 倍もの細かさで位置検出が可能となる。このエンコーダーとシルキースウィフト VCM とあわせて精密な位置制御が可能となって

いる。この駆動システムはZ400/2.8のフォーカスレンズに初搭載し、Z600/4でもレンズ配置、駆動仕様に合わせた最適化設計を行い、採用している。

このようにしてフォーカスレンズのアクチュエーター性能は向上しているが、これだけではAF性能の向上は達成されない。レンズの光学性能はもちろん、Z9の像面位相差AF含めたカメラシステムとしての協調により、AF精度が向上し、先に例として挙げたサッカー選手のように高速、高精度なレンズ位置制御が求められる被写体においても撮影の歩留まりを改善している。

8 優れた逆光耐性

Z400/2.8にて初採用したメソアモルファスコートは、要素開発から生まれた独自の素材を用いて、NIKKORレンズ史上最高の反射防止性能を実現したコーティングである。メソアモルファスコートはナノクリスタルコートの粒子よりもさらに小さいサイズのアモルファス構造を有する粒子が連結した嵩高い構造体が堆積することにより、メソ孔と呼ばれる粒子隙間が膜全体に形成され、膜の高空隙率化が達成される。この多数のメソ孔に空気が含まれることで、ナノクリスタルコートよりもさらに低い屈折率を実現している。また、微細粒子を用いて嵩高い構造体を精密に構成することで、ナノクリスタルコートでは達成できない高空隙率・低散乱の膜構造を簡便な手法で実現することができた [1]。

その効果として、斜入射光に対して高い反射防止効果を持つナノクリスタルコートを凌駕する性能を有しつつ、直入射光に対してもアルネオコートと同等以上の反射防止効果を有するため、様々な入射光に起因するゴーストやフレアを大幅に低減することが可能である。

今回は新規開発のメソアモルファスコートに加え、ナノクリスタルコート、アルネオコート、スーパーインテグレートッドコーティングそれぞれの特性を把握したうえで、適切な箇所に適切なコートを採用し、ゴーストの影響を低減している。また、機構部品によるゴーストやフレアについても、設計段階で光線追跡によるシミュレーションを行い、形状と配置の最適化を図っている。



Fig. 7 画面内に強い光源のある作例

写真 (Fig. 7) は夕日を背景にキリンをシルエットでとらえた作例である。「メソアモルファスコート」や「アルネオコート」を搭載し、さらにゴースト、フレアに配慮して設計したメカ部品を採用しているため、このようなシーンでも抜けの良いクリアな画像が得られる。

9 視覚に頼らない操作性と機動性

本2製品は、プロのフォトグラファーが日常でストレスなく使用できるように、ユーザビリティにもこだわった設計をしている。

各種リング、スイッチやボタンなどの操作部材は以下のものが実装されている。レンズファンクション (以下 Fn) ボタン2、Fnリング、コントロールリング、フォーカスリング、レンズFnボタン1、各種スライドスイッチ、メモリーセットボタン、内蔵テレコンバーター切り換えスイッチである。

これらの操作部材は撮影においてユーザーに様々な撮影体験を提供できる。例えば、本機種で初搭載したFnリングは左右の回転方向それぞれに異なるフォーカス位置を記録し、被写体の変化に合わせて瞬時にフォーカスの位置を呼び出せる機能を割り当てられる。従来機種であれば、フォーカス位置の呼び出し機能をレンズFnボタン2に割り当てることができたが、呼び出しできるフォーカス位置は1か所であった。本機種ではFnリングでフォーカス位置を呼び出せることにより、レンズFnボタン2にはFX/DX切り替えなど異なる機能を割り当てることができ、撮影体制を維持したまま撮影できる構図、シーンが格段に増える。また、ハイレゾズームをコントロールリングに割り当てることによって、単焦点レンズにもかかわらず、まるでズームレンズを使っているかのように構図を変更可能である。発売以降もファームウェアのバージョンアップを通してユーザーの声にこたえる操作性向上にも対応している。フォーカスリングとコントロールリングの機能入れ替えもその一つである。このように今までの常識を覆す撮影方法を実現するために、各種操作部材を配置しているため、ぜひ世界に一つだけの自分に合った設定を探求し、今まで以上に歩留まりの高い撮影体験をしていただきたい。

操作部材の配置もこだわって決定した。撮影をする際に、手持ち撮影でも、三脚撮影でも操作しやすいよう、3Dモデルの作成、モックの作成を繰り返し、様々な使われ方に対応できる操作部材配置を実現している。さらに、操作部材は手の感触で区別ができ、視覚に頼らない操作をできるような細かい配慮も行っている。また、本2製品の操作部材はカメラから見てまったく同じ配置にしておき、こだわった操作性を2機種に統一して実装できていることになる。

機動性、取り回しに対してはレンズの重心位置の変更が大きく寄与している。FマウントのAF-S400/2.8、

AF-S600/4に対して、前側のレンズ部品、機構部品を軽量化することで、鏡筒としての軽量化を実現できただけでなく、重心をカメラ側に大きく移動させることができた。結果として、手持ち撮影、一脚撮影にてレンズをパンニングしたときの慣性力が小さくなり、滑らかな構図変更、流し撮りが可能になった。実際にレンズをカメラに装着し手持ち撮影をしたときの印象は軽量化された質量の数値以上の効果を感じていただけるはずである。

製品全長はZ600/4のほうが長いですが、2機種の重心位置の差を小さく設計できているため、撮影時の使用感を統一できている。撮影シーンによって本2機種を使い分けるユーザーにとっても、直感的に使っていただきやすい製品に仕上がっていると考えます。

10 まとめ

Z400/2.8、Z600/4は機動力、描写性能、機能性を兼ね備えたレンズとなっており、内蔵テレコンバーターを用いることで機材交換なく2本の大口径超望遠レンズをスイッチングするような撮影体験をユーザーに提供する。

多くのフォトグラファーに使用いただき、操作性、描写性能、AF性能、取り回しの良さに関して高評価をいただいている。引き続き、ユーザーと新しい撮影体験を繋ぐ製品を作り続けたいと考えている。

引用文献

- [1] R. Suzuki, "Fabrication of a porous SiO₂ thin film with an ultralow refractive index for anti-reflective coatings," *J Sol-Gel Sci Technol*, vol. 106, no. 3, pp. 860-868, 2023.

猪原祐治 Yuji IHARA
光学本部 第二開発部
2nd Development Department
Optical Engineering Division

坂本祐輔 Yusuke SAKAMOTO
光学本部 第二開発部
2nd Development Department
Optical Engineering Division

山下雅史 Masashi YAMASHITA
光学本部 第三設計部
3rd Designing Department
Optical Engineering Division



猪原祐治
Yuji IHARA



山下雅史
Masashi YAMASHITA



坂本祐輔
Yusuke SAKAMOTO