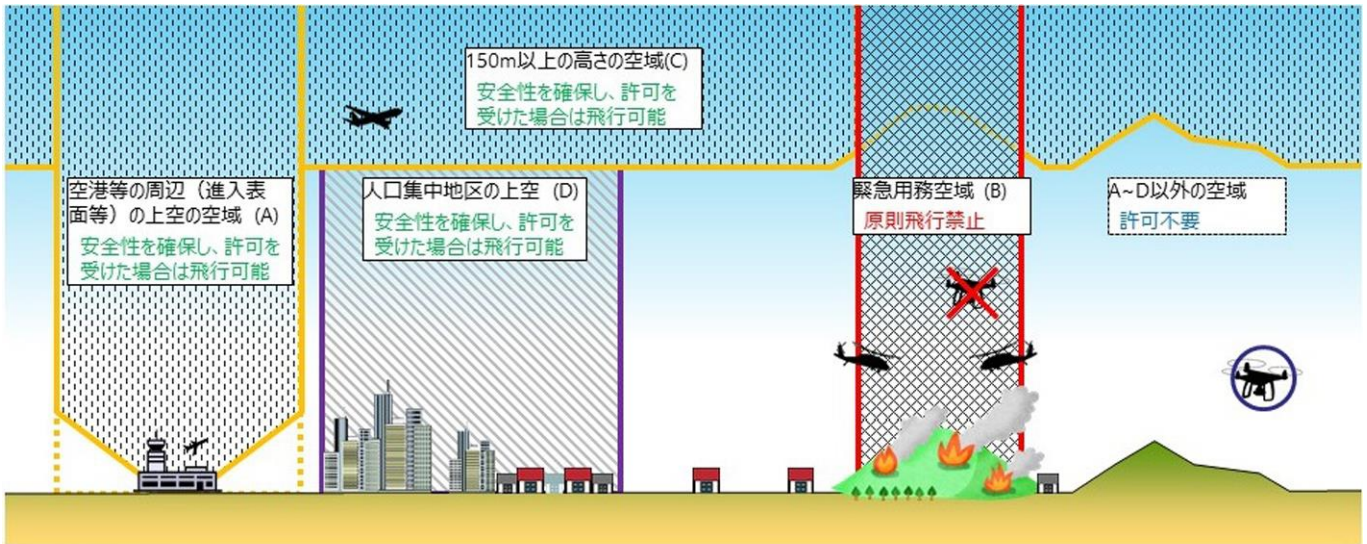




セーフティドローンパイロットを目指して・・・

ドローン空撮カメラの理論

～ドローンプロカメラマンに向けて～



アイラップ
DRONE SCHOOL

ドローン空撮カメラの理論

～ドローンプロカメラマンに向けて～

目次

■ 1.	.....	3
ドローン空撮カメラの基本	.....	3
1-1. シャッター速度	.....	3
1-2. 絞り	.....	3
1-3. ISO 感度	.....	3
1-4. まとめ	.....	3
■ 2. ドローン空撮カメラの撮影モード	.....	4
2-1. シャッター速度優先モード	.....	4
2-2. 絞り優先モード	.....	4
2-3. マニュアルモード	.....	4
2-4. プログラムオートモード	.....	4
2-5. オート ISO 機能	.....	4
2-6. 測光の理解へ	.....	4
■ 3. 露光補正と測光モード	.....	5
3-1. 露光補正	.....	5
3-2. 評価測光	.....	5
3-3. 中央部重点平均測光	.....	5
3-4. スポット測光	.....	5
3-5. AE ロック	.....	5
■ 4. ホワイトバランス	.....	6
4-1. ホワイトバランス	.....	6
4-2. 色温度	.....	6
4-3. ホワイトバランスの意味	.....	6
■ 5. レンズの理論	.....	7
5-1. 焦点距離という用語の混乱	.....	7
5-2. 画焦距離と光焦距離	.....	8
5-3. 画角	.....	8
5-4. 圧縮効果	.....	8
5-5. 望遠レンズと広角レンズ	.....	9

5-6. レンズの種類	9
5-7. イメージセンサーの種類	9
5-8. 35mm 換算焦点距離	10
■6. ピントの理論	11
6-1. ブレとボケの違い	11
6-2. フォーカス	11
6-3. オートフォーカス	11
6-4. 被写界深度	11
6-5. 被写界深度の簡単な理解	11
■7. 被写界深度の理論	12
7-1. 幾何光学	12
7-2. 被写界深度の用語	13
7-3. 被写界深度の導出	14
7-4. 被写界深度のパラメーター	17
7-5. 被写界深度と画角	19
7-6. 被写界深度の最終結論	19
7-7. パンフォーカス	20
■8. その他のカメラ知識	21
8-1. F 値と回折現象	21
8-2. 開放 F 値	21
8-3. 最短撮影距離	21
8-4. ドリィズーム	21
8-5. AEB 撮影	22
8-6. HDR 撮影	22
8-7. RAW データ形式	22
8-8. カメラと太陽	22
■9. 総まとめ	23
■付録	24
付録 1. 35mm 換算焦点距離の図示	24
付録 2. ガウスのレンズ公式の導出	25
付録 3. ピント結線	26
付録 4. 画角結線	27
付録 5. 被写界深度と画角の途中計算	27

■ 1.

ドローン空撮カメラの基本

本書は、ドローン空撮カメラについて主に記載していますが、プロとして1つの作品を作る際、地上撮影したコンテンツと組み合わせる場合が多くあることから、近接撮影の部分等は、1眼レフカメラについても記載しています。

1-1. シャッター速度

シャッターボタンを押すとシャッターが一瞬開きますが、その開いている時間をシャッター速度と呼びます。単位は秒 ([s]) です。シャッター速度は分数で表記され、通常は $1/60 \approx 0.016[s]$ 、最大で $1/4000 \approx 0.00025[s]$ といった非常に小さな値を取ります。シャッター速度を遅くすると露出が増えて明るく撮影できますが、遅くしすぎると写りが明るくなりすぎて真っ白になってしまいます (白飛び)。また、シャッターが長時間開くということは、写真もブレやすくなります。実際には後述の「絞り」や「ISO 感度」を併用することが多いです。シャッター速度は「露光時間」とも呼びます。

1-2. 絞り

カメラに光を取り込む穴の「小ささ」を表す量です。絞りの値は「F 値」と呼ばれ、F 値を大きくすると穴が小さくなるので写りが暗くなります。また広範囲でピントが合うようになります。絞りを決定して写りが暗すぎる場合はシャッター速度を遅くすればよいことになります。絞りはシャッター速度と後述の ISO 感度と並んで露出を調節できる機能です。

肉眼で遠くを見る時に目を細めると遠くにピントが合いますが、これが絞りを絞る動作と全く同じ意味の動作になります。カメラではこれを「被写界深度が深い」といいます。ただし絞り過ぎると「回折現象」による画質低下を招くので要注意です。(8-1. 「F 値と回折現象」参照)

1-3. ISO 感度

光を感じ取るカメラの感度 (受光感度) を表す量です。環境の光が同じ強さでも ISO 感度を低くすると写りは暗くなり、ISO 感度を上げると写りは明るくなります。ISO を使わずに明るく撮るにはシャッター速度を遅くするか絞りを開くかですが、これらを決定した上で明るさ調節できるのが ISO 感度です。ただし ISO 感度は写真の明るさを電氣的に調節する為、明るくし過ぎると電気ノイズの増大で画質低下を引き起こします。ちょうどよい ISO 感度を決めるのは写真に求める品質や撮影者の感覚次第というのが大きいでしょう。

1-4. まとめ

露出を調節する機能はシャッター速度 (露光時間) ・ F 値 ・ ISO 感度の 3 つです。これらの関係を簡単に書くと次のようになります。

$$\text{露出} \propto \left(\frac{\text{露光時間}}{\text{F 値}} + \text{ISO 感度} \right)$$

したがって定性的に次のようなことがいえます。

- ・露出一定の場合、露光時間を長くするにはF値を上げる必要がある。
- ・露出を増やすには、露光時間を長くするか、F値を下げるかである。
- ・露光時間とF値を弄らなくても、ISO感度だけで露出を調節できる。

■2. ドローン空撮カメラの撮影モード

シャッター速度優先モードと絞り優先モード、その他のモードの解説をします。

2-1. シャッター速度優先モード

シャッター速度を撮影者が決定し、F値はカメラが自動決定するモードです。露出を維持するようにF値が決定されます。Tv (=Time Value) とかSSと表記されます。

2-2. 絞り優先モード

F値を撮影者が決定し、シャッター速度はカメラが自動決定するモードです。露出を維持するようにシャッター速度が自動決定されます。Av (=Aperture Value) とかAと表記されます。

2-3. マニュアルモード

シャッター速度・F値・ISO感度を撮影者が手動決定するモードです。露出、ブレ具合、被写界深度等を自由に調節できますが難易度は高いです。M (=Manual) と表記されます。

2-4. プログラムオートモード

シャッター速度とF値を露出に応じて自動決定します。手動操作は露光補正（後述 3-1）のみになるので撮影に集中できます。P (=Program) とかAutoと表記されます。

2-5. オートISO機能

環境の光に応じてISO感度を自動調節してくれる機能です。ここまで(1-1~2-4)の解説ではオートISOを使わない前提でしたがどの場合でも使えます。自動調節するISO感度の範囲を指定することもできます。

2-6. 測光の理解へ

シャッター速度優先モード、絞り優先モード、プログラムオートモードでは、露出を維持するようにパラメーターが変化しますが、この露出はカメラが自動で決めていて、「測光」と呼ばれます。（後述 3章参照）

■3. 露光補正と測光モード

もう一つの明るさ調節方法です。

3-1. 露光補正

1章で説明したように、露出はシャッター速度・F値・ISO感度で調節しますが、Tvモード・Aモード・Pモードのように露出を維持してパラメーターを調節するモードの場合、露出はカメラが自動決定しています（自動測光とかAEと呼ばれます）。Tv,A,P等で写りが明るすぎる場合は、露光補正をマイナス方向に調節すれば暗めに調節され、写りが暗すぎる場合は露光補正をプラス方向に調節すれば明るめに調節されます。明るい被写体と暗い被写体が同居した構図でどちらを印象的に見せたいか決める際に使ったりします。MモードであればAEもなく完全手動なので好きなように調節できますが難易度は高いです。

露光補正に似た用語で「調光補正」というのがありますが、こちらはストロボの明るさを調節する機能で露光補正とは関係ありません。

3-2. 評価測光

測光機能の一種で、写真全体の明るさの分布を元に平均的な明るさを露出とする機能です。普段はこのモードで問題ありません。マルチ測光などとも呼ばれます。

3-3. 中央部重点平均測光

測光機能の一種で、写真の中央部に合わせて露出を決定する機能です。後述のスポット測光ほどピンポイントではなく、中央部とその周辺の平均的な明るさを露出とする機能です。

3-4. スポット測光

測光機能の一種で、写真の中央部のみ測光して露出を決定する機能です。主題を強調しやすいですが、被写体の周りは黒潰れや白飛びになりやすいです。明暗差の激しいシーンや逆光での被写体撮影に使います。

3-5. AEロック

測光機能で決定した露出は構図内の光が変化すると変わってしまいます。AEロックを使うと一定の露出で撮影できるようになり、その露出で構図を変えて撮影するなどができます。

■4. ホワイトバランス

写真撮影のカラーフィルターとして使える「ホワイトバランス」についての解説です。

4-1. ホワイトバランス

写真の色具合を調節する機能です。何種類かの既定値があらかじめ設定されていて、例えば「曇り」を選択するとオレンジのような色味になり、「蛍光灯」を選択すると青のような色味になります。このようにホワイトバランスはカラーフィルターとして使える機能です。暖色系にすれば暖かくて優しい印象、寒色系にすれば冷たくてシャープな印象といった感じになります。

4-2. 色温度

色を温度で表現した量で、単位は絶対温度のケルビン ($[K]$) です。例えば炎は高温になると赤色から青色へと変化します。このことから赤に近い色温度は 2,000K 側、青に近い色温度は 10,000K 側にあります。ホワイトバランスは先述の「曇り」や「蛍光灯」といった既定値だけでなく、色温度でも指定できます。

4-3. ホワイトバランスの意味

ホワイトバランスという用語の由来は、写真を赤みでも青みでもなく白みに近づけるという意味です。例えば、写真の色味が青い場合に色温度を大きな値にすると、赤寄りに補正できます。つまり色温度を「環境の色味」に合わせると写真が赤みでも青みでもなく白みに調整されるということです。

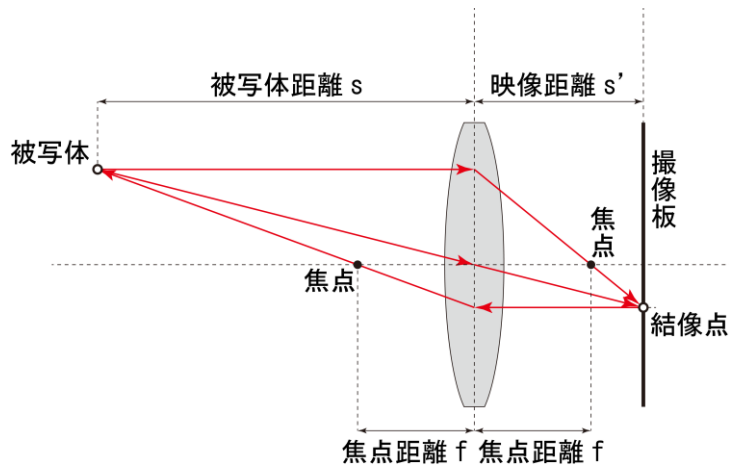
4-1 の蛍光灯や曇りも、環境が蛍光灯であれば蛍光灯を選択し、環境が曇りであれば曇りを選択すればちょうどよく白っぽい色味になります。

■5. レンズの理論

焦点距離や画角の解説をします。

5-1. 焦点距離という用語の混乱

焦点距離を初めて学ぶのは一般に中学高校の理科の授業でしょう。下図のような絵を用いて凸レンズの働きを考えるものです。下図で被写体距離 s 、映像距離 s' 、焦点距離 f は7章で解説する「ガウスのレンズ公式」という関係式で結ばれ、それも中学高校で習う公式です。(これ以降凸レンズをレンズと呼びます)



(図1)

実験事実として、レンズに光を平行に通すと光はレンズの先のある一点に集光されますが、この点が焦点です。太陽光をレンズで集めるとその点が焼け焦げることから焦点と呼ばれます。レンズ中心から焦点までの距離を焦点距離と呼びます。焦点距離はレンズの厚さや表面の曲率で決まる固有の値で、自由に変更できるものではありません。以上が中学高校で習う焦点距離です。

ところがカメラ用語としての焦点距離は、レンズ中心からイメージセンサーまでの距離として使われます。この解説として「無限遠の被写体を考えた時の焦点距離」とか「ピントを合わせた時にイメージセンサーに像を結ぶ点までの距離が焦点距離」といったものがあり、いずれも中学高校で習う内容で考えると、それは焦点距離ではなく「映像距離」を指しています。カメラ界限では焦点距離という言葉が映像距離を指すという事態になっています。CANON や NIKON、SONY などの大手カメラメーカーの公式サイトでも同じような意味合いで映像距離を焦点距離と呼んでいます。

話を纏めると焦点距離という用語は、

・ 中学高校で習った焦点距離
・ 画角の指標としての焦点距離

(表1)

という二者の用法が存在しています。

5-2. 画焦距離と光焦距離

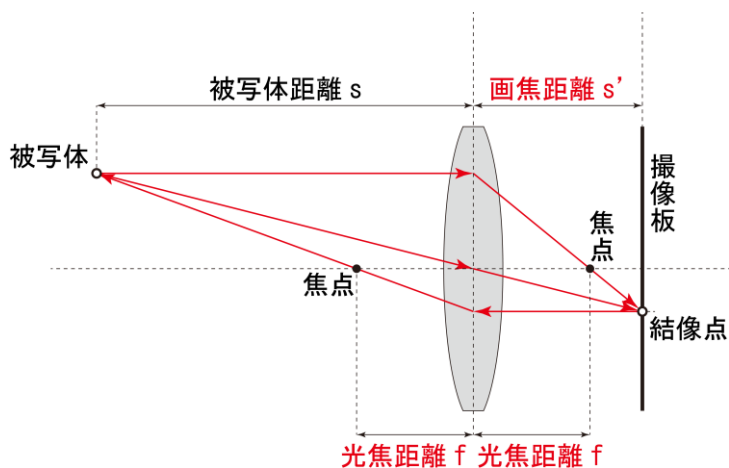
この焦点距離問題が絡むカメラの概念として主に挙げられるのは、画角、単焦点レンズ、ズームレンズ、実焦点距離、35mm 換算焦点距離、被写界深度、パンフォーカスです。これらを整理して理解するには次のように説明を区切れれば良いと考えられます。

①	画角、単焦点レンズ、ズームレンズ、実焦点距離、35mm 換算焦点距離	5 章で解説
②	被写界深度、パンフォーカス	6、7 章で解説

(表 2)

①は画角に関する内容でしかない為、レンズ中心とセンサーとの距離（つまり映像距離 s' ）のみで考えて問題ない概念です。焦点距離の定義がどうであろうと焦点距離は完全に無関係です。ガウスのレンズ公式が一切無関係です。この映像距離をカメラ界隈では焦点距離と呼ぶので、映像距離を「**画焦距離**」と呼び換えます。したがって画焦距離は可変です。（画焦距離…画角を変える焦点距離という意味です）

②はガウスのレンズ公式が必要で、中学高校で習ったのと同様に考えることになります。そのため焦点距離を「**光焦距離**」と呼び換えます。したがって光焦距離は固定です。（光焦距離…幾何光学的な焦点距離という意味です）



(図 2)

以上の定義で話を進めます。

5-3. 画角

カメラが捉える視野の角度です。画焦距離が長いレンズは画角が狭く（＝望遠レンズ）、画焦距離が短いレンズは画角が広い（＝広角レンズ）です。レンズには画焦距離を変えられない単焦点レンズと、変えられるズームレンズがあり、ズームレンズではズームリングを回して画焦距離を変えることで画角を調節できます。画焦距離はズームレンズにも単焦点レンズにも表記されています。

5-4. 圧縮効果

画角が狭いと望遠撮影になりますが、これは写真の奥行き感（遠近感）が薄れることを意味します。望遠撮影において被写体と背景が圧縮されたように撮影されることから、圧縮効果と呼ばれます。

5-5. 望遠レンズと広角レンズ

「標準レンズ」よりも画焦距離が長い (=画角が狭い) レンズを望遠レンズ、標準レンズよりも画焦距離が短い (=画角が広い) レンズを広角レンズと呼びます。ただし実際は標準レンズの明確な定義は無く、メーカー毎の公称スペックや、あるいは実際に撮影して感じをつかみます。

出典：Wikipedia「標準レンズ」

ただし人間の自然な視野角を仮に45度付近と仮定すると、まず35mmフルサイズセンサーの対角線は縦24mm×横36mmであることから43.3mmで、画焦距離を50mmとすれば画角 θ は次のように約45度となりますので、

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left[\frac{43.3/2}{50} \right] = 46.8^\circ$$

つまり35mmセンサーを使う場合において50mmより長い画焦距離を望遠レンズ、50mmより短い画焦距離を広角レンズと考えることもできます。これも明確な定義はありませんが、一つの説というか考え方です。

出典：コトバンク「標準レンズ」

5-6. レンズの種類

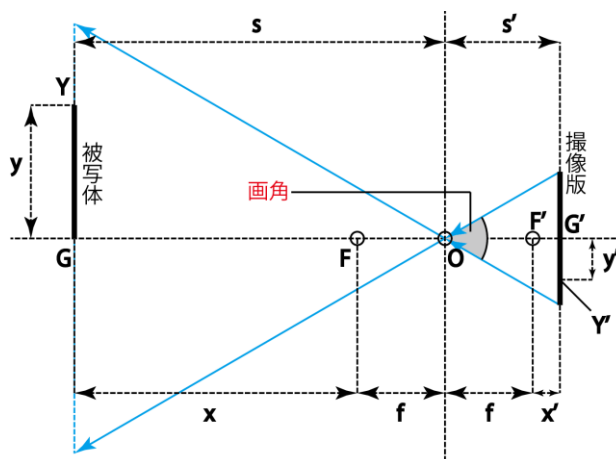
レンズは大きく分けて、ズームができない「単焦点レンズ」とズームできる「ズームレンズ」があります。

単焦点レンズ	ズーム不可。開放F値が低く、ボケ表現や明るい写真が撮りやすい。
ズームレンズ	ズーム可。標準・広角・望遠の種類がある。
マクロレンズ	接写が得意。単焦点レンズの一種で、標準・広角・望遠の種類がある。
超広角レンズ	広角レンズよりも画角が広く、風景を撮るだけでも非現実的な感じに写る。

(表3)

5-7. イメージセンサーの種類

画角を決める要素は画焦距離と、イメージセンサーの対角線です。イメージセンサーは撮像板とも呼ばれます。



(図3)

イメージセンサーの種類としては大きい順に次のようなものがあります。同じ画焦距離でも、センサーサイズが変わると画角が変わります。

センサー名	横×縦	センサーサイズ
35mm フルサイズ	36mm×24mm	43.3mm
APS-C	23.6mm×15.8mm	28.4mm
APS-C(キャノン)	22.4mm×14.9mm	26.9mm
マイクロフォーサーズ	17.3mm×13mm	21.6mm
1 型	13.2mm×8.8mm	15.9mm
1/2.3 型	5.9mm×4.4mm	7.61mm

(表 4)

これだけの種類の中で、ドローン空撮カメラで主に使うのは 35mm フルサイズ、APS-C、APS-C(キャノン)、マイクロフォーサイズの 4 つぐらいです。ちなみにドローンのセンサーは Phantom4 で 1/2.3 型、Phantom4 Pro で 1 型です。

5-8. 35mm 換算焦点距離

レンズや本体のスペックを気にする場合や、異なる本体にレンズを付け替えるといった場合に必要な知識です。

35mm 換算焦点距離とは「35mm フルサイズセンサー」に対応する画焦距離で、35mm フィルム時代はこれだけで良かったのですが、APS-C 等の様々なセンサーが登場するようになった現代では、画焦距離を 35mm センサーにおける値に換算表記した方がフルサイズに慣れている人にとっては分かりやすいです。カメラのスペック表では実際の画焦距離 (=実焦点距離と呼びます) と 35m 換算焦点距離が併記されることもあります。また、望遠や広角に明確な定義が存在しないとしても、5-5 で解説したように、フルサイズの標準的な画焦距離を 50mm と考えておけば、これより長いと望遠、短いと広角という判断も一応できます。

35mm 換算焦点距離は、あるレンズをフルサイズ機以外のセンサーで使用する場合の画焦距離をフルサイズ機で考えた仮想的な画焦距離で、次の計算式で求めることができます。

$$35\text{mm 換算焦点距離}[mm] = \left(\frac{35\text{mm センサーサイズ}[mm]}{\text{実センサーサイズ}[mm]} \right) \times \text{実焦点距離}[mm]$$

実用的には分数部分を 1.5 や 1.6、2.0 で計算することが多いです。ちなみにフルサイズ機では 35mm 換算は不要で、35mm 換算焦点距離と実焦点距離が同じ値です。(詳細な解説は【付録 1】参照)



■6. ピントの理論

ドローン空撮カメラのピント操作と、「被写界深度」についての理解がメインです。

6-1. ブレとボケの違い

ブレ…シャッター速度を遅くする、カメラを振る、被写体が高速で動く等で写真が文字通り「ブレる」こと。

ボケ…被写体のピントが合っていない状態。被写体の前景や背景のみぼかすテクニックがある。(後述 6-4 参照)

6-2. フォーカス

目標にピントを合わせることです。オートフォーカスを使えば簡単に合わせられますが、手動で調節することもできます。写真全体でピントが合っている状態は「パンフォーカス」と呼ばれます。カメラによっては、ピントを写真のどこに合わせるか(写真の中心・被写体の顔など)を自動検出する機能もあります。

6-3. オートフォーカス

モニター画面上でピントを合わせたい部分をタッチすると、そこにピントが合うように自動調整されます(あまり近すぎると自動調整できません)。

6-4. 被写界深度

ピントが合っている範囲(=前景と背景の深さ)のことです。被写体にピントを完璧に合わせた時、その前景と背景は少なからずボケますが、このボケを許容できる範囲が被写界深度となります。被写界深度はF値と被写体距離と光焦距離に依存します。光焦距離はカメラのカタログを見ても不明な量なので、ガウスのレンズ公式から求めます。(7章参照)

6-5. 被写界深度の簡単な理解

被写界深度の性質を簡単に書くと次のようになります。

$$\text{被写界深度} \propto \left(\frac{\text{F 値} \times \text{被写体距離}}{\text{光焦距離}} \right)$$

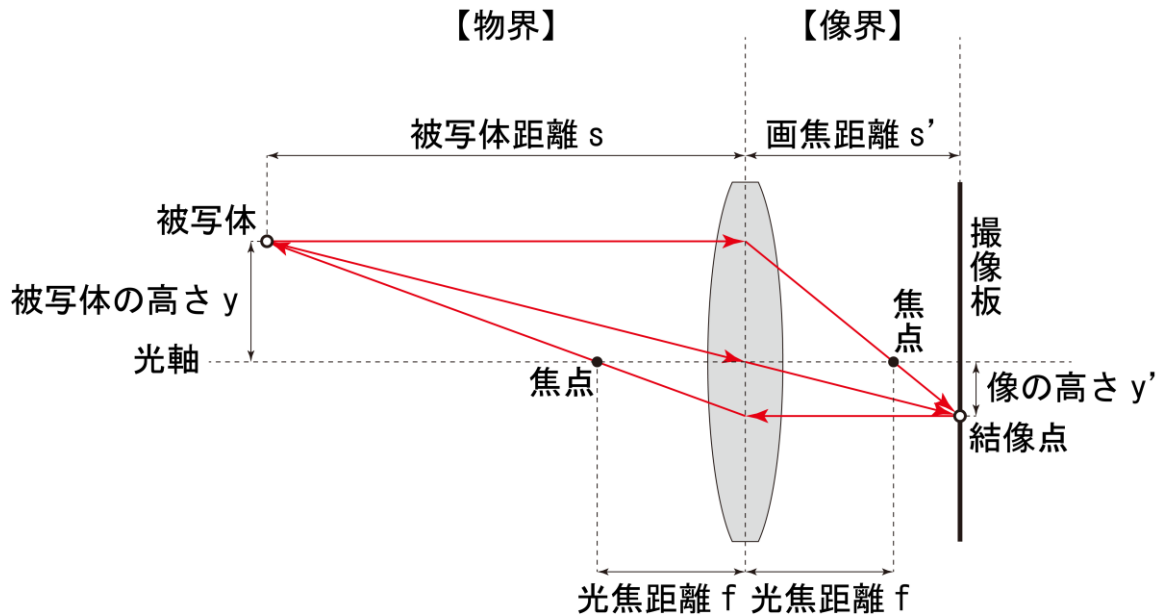
被写界深度を深くするにはF値を上げ、光焦距離が短く、被写体から離ればよいことになります。

■7. 被写界深度の理論

被写界深度を理論的に解説します。

7-1. 幾何光学

まず下図を使って幾何光学の用語と理論を解説します。赤い線は光の軌跡で、まっすぐに入射した光はレンズの先で焦点を通ります。



(図 4)

光軸	レンズ中心を法線方向に通る仮想的な直線。
光焦距離 f	レンズ中心から焦点までの距離。レンズの前後で等しく、自由に変えられない。
撮像板	イメージセンサー。具体的には 35mm センサーや APS-C、マイクロフォーサーズ等。
結像点	被写体を捉えたレンズが像を結ぶ一点。
物界	レンズ中心から被写体側の領域。
像界	レンズ中心からセンサー側の領域。
被写体距離 s	レンズ中心から被写体までの距離。
画焦距離 s'	レンズ中心からセンサーまでの距離。

(表 5)

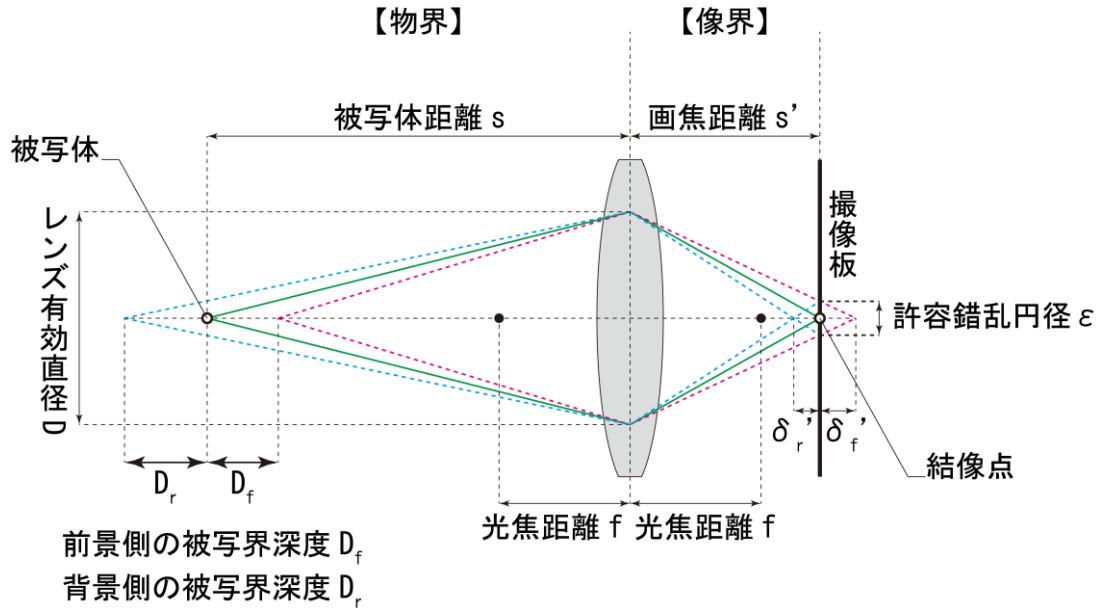
幾何光学では次に示す「ガウスのレンズ公式」も使います。(導出は【付録 2】参照)

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$s[mm]$: 被写体距離
 $s'[mm]$: 画焦距離
 $f[mm]$: 光焦距離

7-2. 被写界深度の用語

被写界深度は下図の「ピント結線」で解説します（【付録3】参照）。被写体と結像点はレンズの中心（光軸上）にあるとし、緑の実線がその光の軌跡です。水色、ピンク色の点線はそこから前後にずれた位置の光の軌跡です。



(図5)

・ F 値

絞りの強さを表現する量で、レンズ有効直径 $D[mm]$ （後述）に対する光焦距離 $f[mm]$ という定義です。この定義によると、絞りを絞って D を小さくし、光焦距離 f が長いと F 値が大きくなります。

$$F = \frac{f}{D}$$

・ レンズ有効直径

絞りを操作すると光を取り込む穴の大きさが変わりますが、この穴の大きさをレンズ有効直径と呼びます。撮影に使われるのはレンズの中心付近だけなので有効という言葉が付きます。単位は $[mm]$ です。

・ 許容錯乱円径

被写体にピントを合わせた時、その前景と背景はガウスのレンズ公式により結像点がセンサーの前後にずれま。例えば光焦距離 $f = 50$ とすれば、

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{50}$$

となり被写体距離 s (=前景と背景)が伸びると映像距離 s' が短くなります。するとセンサーに写る被写体の結像点は点ではなく円の形になり、ピントがボケることになります (ピンボケ)。この円を錯乱円と呼び、ピンボケを許容できる錯乱円の直径を許容錯乱円径 ε [mm]と呼びます。

・焦点深度

被写界深度は物界側でピンボケを許容できる範囲ですが、像界側でピンボケを許容できる範囲を焦点深度と呼びます。焦点深度は被写界深度に対応する量で、計算を簡単に考えるべく以下の近似を行います。

像界を拡大した右図でセンサーだけを前後に動かす場合を考えます。ここで可動範囲はピント結線と許容錯乱円径との交点までとし、その前後距離を焦点深度 δ と呼びます。 δ は図5の δ'_r, δ'_f と微妙に異なりますが、ほぼ同じと考えて良いです。つまり次の関係が成り立ちます。

$$\boxed{(\delta'_r = \delta'_f) \approx \delta} \dots \alpha 1$$

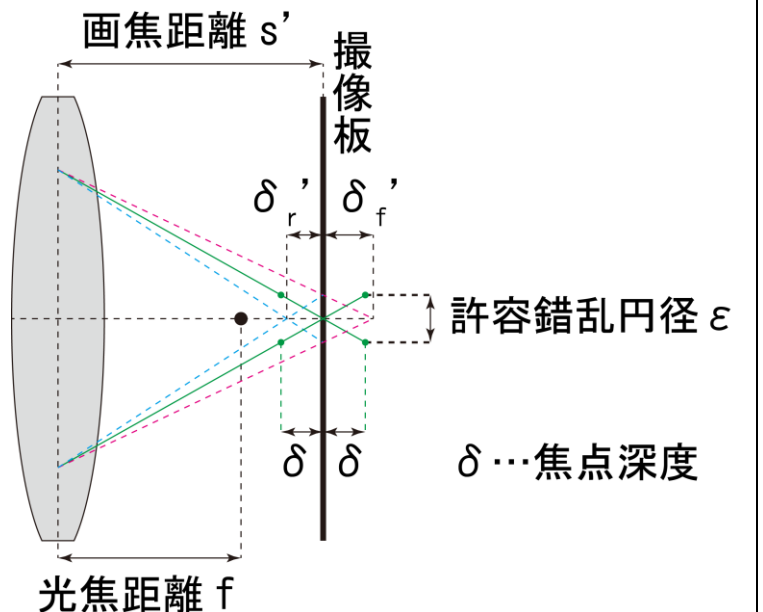
またF値も近似します。被写体距離 s を充分離せばガウスのレンズ公式により画焦距 s' と光焦距 f がほぼ等しくなる為、F値は次のように近似できます。

$$F = \frac{f}{D} \approx \frac{s'}{D}$$

s'/D は右図により δ/ε に等しいので、

$$\boxed{F \approx \frac{\delta}{\varepsilon}} \dots \alpha 2$$

これでF値の近似は完了です。



(図6)

7-3. 被写界深度の導出

まずガウスのレンズ公式は、

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

ですが、これに被写界深度 D_f を使うと、

$$\frac{1}{s - D_f} + \frac{1}{s' + \delta'_f} = \frac{1}{f}$$

となります。ここでは前景側のみを計算しますが、背景側も同様の考え方で導出できるので省略します。計算を進めると、

$$\frac{1}{s - D_f} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s' + \delta'_f}$$

右辺を通分して、

$$\begin{aligned} &= \frac{s' + \delta'_f}{f(s' + \delta'_f)} - \frac{f}{f(s' + \delta'_f)} \\ &= \frac{s' + \delta'_f - f}{f(s' + \delta'_f)} \end{aligned}$$

ここで式(1)により $\delta'_f \approx \delta$ なので、

$$= \frac{s' + \delta - f}{f(s' + \delta)}$$

両辺をひっくり返して、

$$s - D_f = \frac{f(s' + \delta)}{s' + \delta - f}$$

画焦距離 s' を消去すべくガウスのレンズ公式を

$$s' = \frac{sf}{s - f}$$

と変形して使うと、

$$s - D_f = \frac{f\left(\frac{sf}{s - f} + \delta\right)}{\frac{sf}{s - f} + \delta - f}$$

さらに計算を進めると、

$$\begin{aligned} &= \frac{f\left(\frac{sf}{s - f} + \delta\right) s - f}{\frac{sf}{s - f} + \delta - f s - f} \\ &= \frac{f(sf + \delta(s - f))}{sf + (\delta - f)(s - f)} \end{aligned}$$

分子に $0 = -f^2 + f^2$ を加えて分母と分子の計算をそれぞれ進め、

$$\begin{aligned} &= \frac{f(sf - f^2 + f^2 + \delta(s - f))}{sf + \delta s - \delta f - sf + f^2} \\ &= \frac{sf^2 - f^3 + f^3 + \delta f(s - f)}{\delta s - \delta f + f^2} \\ &= \frac{f^2(s - f) + f\{f^2 + \delta(s - f)\}}{f^2 + \delta(s - f)} \\ &= \frac{f^2(s - f)}{f^2 + \delta(s - f)} + \frac{f\{f^2 + \delta(s - f)\}}{f^2 + \delta(s - f)} \\ &= \frac{f^2(s - f)}{f^2 + \delta(s - f)} + f = s - D_f \end{aligned}$$

これを D_f について解くと、

$$D_f = s - f - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)}$$

右辺の第一項 s と第二項 f に1を掛けて、そこだけで計算を進めると、

$$\begin{aligned} &= \frac{s\{f^2 + \delta(s-f)\}}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f\{f^2 + \delta(s-f)\}}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{sf^2 + \delta s(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^3 + \delta f(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{sf^2 + \delta s(s-f) - f^3 - \delta f(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{sf^2 - f^3 + \delta s(s-f) - \delta f(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{f^2(s-f) + (\delta s - \delta f)(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{f^2(s-f) + \delta(s-f)(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{f^2(s-f) + \delta(s-f)^2}{f^2 + \delta(s-f)} - \frac{f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{f^2(s-f) + \delta(s-f)^2 - f^2(s-f)}{f^2 + \delta(s-f)} \\ &= \frac{\delta(s-f)^2}{f^2 + \delta(s-f)} \end{aligned}$$

ここで、式α2より $\delta \approx \epsilon F$ なので上式は、

$D_f = \frac{\epsilon F(s-f)^2}{f^2 + \epsilon F(s-f)}$
$\epsilon[mm]$: 許容錯乱円径
F : F値
$s[mm]$: 被写体距離
$f[mm]$: 光焦距離

となります。これが前景側の被写界深度 D_f の計算式です。ちなみに背景側の被写界深度 D_r は同様に、

$$\frac{1}{s + D_r} + \frac{1}{s' - \delta'_r} = \frac{1}{f}$$

から始めて、

$D_r = \frac{\epsilon F(s-f)^2}{f^2 - \epsilon F(s-f)}$

となります。導出過程で被写体距離 s を大きく取るという近似をしている為、近接撮影（マクロ撮影）では計算

式が上手く使えないことになります。具体的には 1.5m から 2m 以上の被写体距離を取ればよいでしょう。ここで、被写体距離を充分離すということは、光焦距離 f は画焦距離 s' とほぼ等しくなるので、被写界深度を次のように書き換えます。

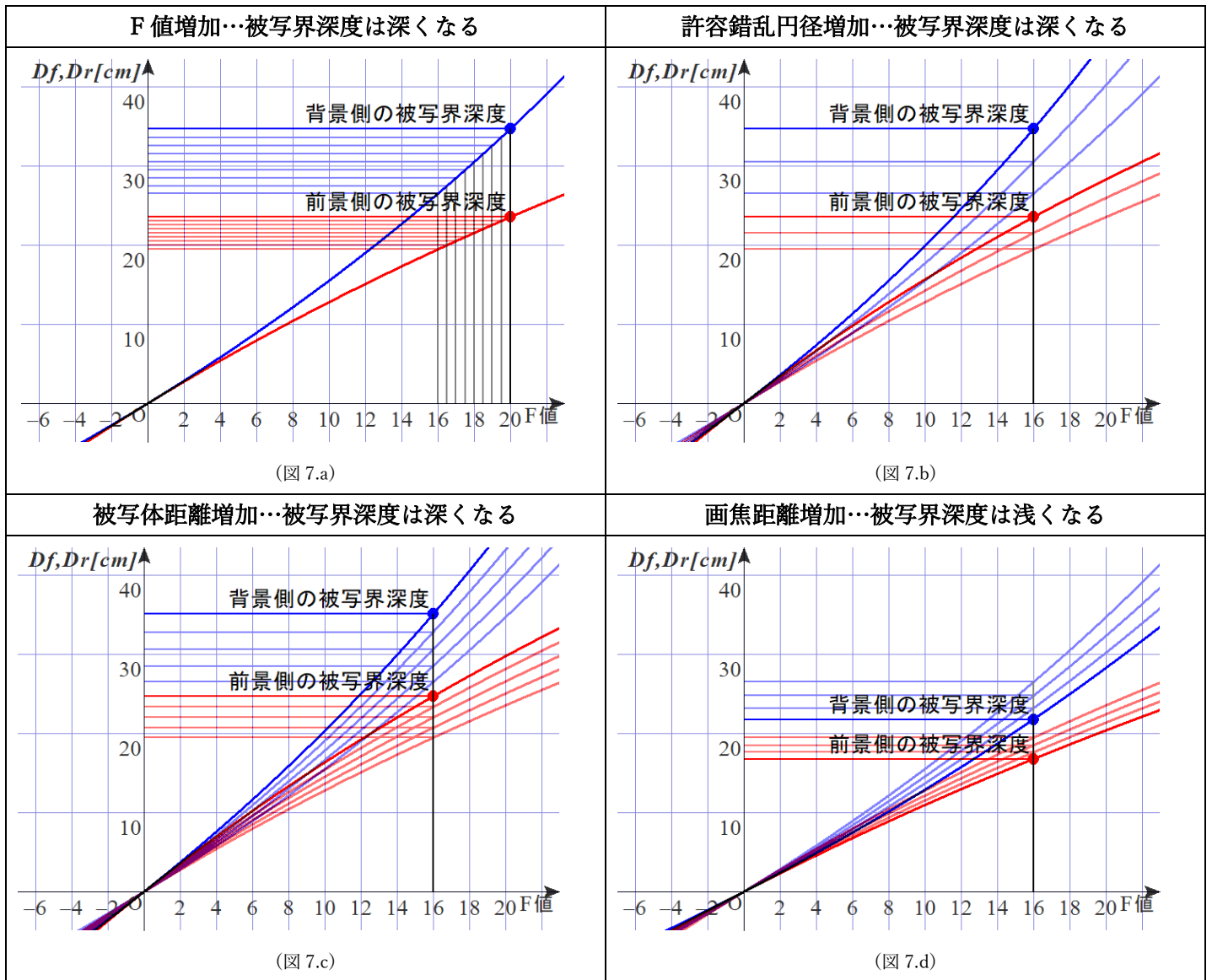
$$D_f \approx \frac{\varepsilon F(s - s')^2}{s'^2 + \varepsilon F(s - s')} \dots 7-1$$

$$D_r \approx \frac{\varepsilon F(s - s')^2}{s'^2 - \varepsilon F(s - s')} \dots 7-2$$

これが被写界深度の計算式です。被写体距離を充分離せばこのように、光焦距離を画焦距離で置き換えられることになります。今後はこの式をもとに被写界深度の性質を考えます。

7-4. 被写界深度のパラメーター

導出で分かったように被写界深度には F 値、許容錯乱円径、被写体距離、画焦距離という 4 つのパラメーターがあり、下図のように動きます。F 値、許容錯乱円径、被写体距離はその増加で被写界深度も深くなりますが、画焦距離だけは被写界深度が浅くなります。ちなみに許容錯乱円径は、フィルム時代は $30\mu\text{m}$ 程度だったそうですが、写真をデジタルで見る現代では画像を PC で拡大できることから、センサーの 1 画素分 ($1\sim 8\mu\text{m}$) にまで厳しくなったようです。基本的にはセンサー対角線の $1/1500$ の長さを許容錯乱円径として使います。



被写界深度は、考慮すべきことがもう一つあります。それは「画角」です。F 値以外の 3 つのパラメーターは画角を変化させる要素となっており、画角が変わると構図が変わってしまう為、この 4 つの図だけで被写界深度の大小を考えるのは十分ではありません。

画角を維持しつつパラメーターを変化させる方法には次の 4 通りがあります。

- | |
|--|
| ①センサー対角線（許容錯乱円径 ϵ ）を 2 倍にし、画焦距離 s' も 2 倍にする |
| ②センサー対角線（許容錯乱円径 ϵ ）を 2 倍にし、被写体距離 s を 1/2 にする |
| ③センサー対角線（許容錯乱円径 ϵ ）を 1/2 倍にし、被写体距離 s を 2 倍にする |
| ④画焦距離 s' を 2 倍にし、被写体距離 s も 2 倍にする |

(表 6)

7-5 ではこれについて考えていきます。

7-5. 被写界深度と画角

まず前景側の被写界深度 D_f (式 7-1) を次のように簡略化していきます。(D_r でも話は同じです)

$$D_f = \frac{\varepsilon F(s-s')^2}{s'^2 + \varepsilon F(s-s')} = \frac{\varepsilon F s^2}{s'^2 + \varepsilon F s} = \frac{1}{\frac{s'^2}{\varepsilon F s^2} + \frac{\varepsilon F s}{\varepsilon F s^2}} = \frac{1}{\frac{s'^2}{\varepsilon F s^2} + \frac{1}{s}} = \frac{1}{\frac{s'^2}{\varepsilon F s^2}}$$

最後の変形は、被写体距離 s を 1500mm 程度以上とすれば $1/s = 0$ と見做せる為です。したがって、

$$D_f = \frac{\varepsilon F s^2}{s'^2} \dots 7-3$$

となります。さらにもう一つの準備として、元のパラメーターを 2 倍した結果を $\langle \rangle$ で定義し、1/2 倍した結果を $[\]$ で定義します。これで準備完了です。

$$\left. \begin{array}{l} \langle \varepsilon \rangle = 2\varepsilon \\ \langle s \rangle = 2s \\ \langle s' \rangle = 2s' \end{array} \right\} \dots 2 \text{ 倍の定義}, \quad \left. \begin{array}{l} 2[\varepsilon] = \varepsilon \\ 2[s] = s \end{array} \right\} \dots 1/2 \text{ 倍の定義}$$

途中計算は冗長なので【付録 5】に回しますが結論は次のようになります。

(すべて画角を維持し、F 値を固定した場合です)

① ε, s' を共に 2 倍	$\frac{D_f}{2} = \frac{\langle \varepsilon \rangle F s^2}{\langle s' \rangle^2}$	センサーと画焦距離で画角維持する場合、センサーと画焦距離を元の 2 倍にすると被写界深度は元の半分になる。逆に センサーと画焦距離を元の半分にする と被写界深度は元の 2 倍になる。
② ε を 2 倍、 s を 1/2 倍	$\frac{D_f}{2} = \frac{\langle \varepsilon \rangle F [s]^2}{s'^2}$	センサーと被写体距離で画角維持する場合、センサーを元の 2 倍、被写体距離を元の半分にすると被写界深度は元の半分になる。
③ ε を 1/2 倍、 s を 2 倍	$2D_f = \frac{[\varepsilon] F \langle s \rangle^2}{s'^2}$	センサーと被写体距離で画角維持する場合、 センサーを元の半分、被写体距離を元の 2 倍にする と被写界深度は元の 2 倍になる。
④ s', s を 2 倍	$D_f = \frac{\varepsilon F \langle s \rangle^2}{\langle s' \rangle^2}$	画焦距離と被写体距離で画角維持する場合、画焦距離と被写体距離を 2 倍にしても被写界深度は変化しない。逆に画焦距離と被写体距離を 1/2 倍にしても被写界深度は変化しない。

(表 7)

カメラマンがよく言う「小さいセンサーで撮影すると被写界深度が深くなる」というのは①か③です。センサーを小さくした代わりに広角にするか被写体距離を取っているのです。またこの表 7 によると、センサーが介在する変化 (①~③) でのみ被写界深度が変化し、どれもセンサーを小さくすると被写界深度が深くなります。

7-6. 被写界深度の最終結論

まず被写界深度には 4 つのパラメーターがあり、被写界深度を浅くする操作は次の通りです。

操作 1... 「F 値を減らす」

操作 2... 「許容錯乱円径を小さくする」

操作 3... 「被写体に近づく」

操作 4... 「画焦距離を長くする」

これに表 7 の①~④を加えれば被写界深度の性質を全て言い尽くしたことになります。ちなみに①で被写界深度

を深くし、さらに画焦距離が短いとより被写界深度が深くなりますが、これはスマホのカメラでボケの写真を撮るのが困難な理由です。

7-7. パンフォーカス

背景側の被写界深度が無限大になるフォーカスをパンフォーカスと呼びます。背景側の被写界深度 D_r (式 7-2)を使えばその条件を求められますが、計算を簡単にすべく「 $s \approx s - s'$ 」という近似をします。例えば被写体距離 2m に対し画焦距離 5cm のような状況で、普通に写真撮影するには十分適用可能な近似です。すると D_r は、

$$D_r = \frac{\varepsilon F s^2}{s'^2 - \varepsilon F s} = \frac{s}{\frac{s'^2}{\varepsilon F s} - 1}$$

となります。パンフォーカスでは D_r が無限大なので、上式の分母が 0 である必要があります。したがって、

$$\frac{s'^2}{\varepsilon F s} - 1 = 0$$

$$\frac{s'^2}{\varepsilon F s} = 1$$

$$\boxed{\frac{s'^2}{\varepsilon F} = s_{df}}$$

という関係が得られます。 s_{df} は「過焦点距離」と呼ばれる量で、パンフォーカスを実現できる被写体距離を表します。例えば 35mm 機で画焦距離 28mm の広角レンズで考えると、許容錯乱円径 ε を $8\mu\text{m}$ とすれば、

$$s_{df} = \frac{28^2}{0.008F} = \frac{28^2}{0.008F} = \frac{784}{0.008F} = \frac{98,000}{F}$$

となり、F 値を仮に「8」とすれば、

$$s_{df} = 12,250\text{mm} = 12.25\text{m}$$

となります。つまり 35mm 機で F 値を 8 に設定したとき、被写体距離 12.25m 付近がパンフォーカス撮影できることを意味します。過焦点距離にフォーカスするとパンフォーカスになるわけです。ちなみに導出は省略しますが、パンフォーカス時における前景側の被写界深度は過焦点距離 s_{df} の半分になります。ここで見たようにパンフォーカスは広角ほど過焦点距離が短くなって実現しやすいです。

ここでは 35mm 機で説明しましたが、APS-C 機などでも過焦点距離を算出できます。例えば同じ F 値、同じ構図で考えると、許容錯乱円径 ε は 35mm 機の 1/1.6 倍、画焦距離 s' も 35mm 機の 1/1.6 倍なので、

$$\frac{\frac{s'^2}{1.6^2}}{\frac{\varepsilon}{1.6} F} = s_{df}$$

$$\frac{s'^2}{\varepsilon F} \frac{1.6}{1.6^2} = s_{df}$$

$$\frac{s'^2}{\varepsilon F} = 1.6s_{df}$$

となります。同じ構図を小さいセンサー機で撮影する場合、過焦点距離はその倍数で長くなります。

■8. その他のカメラ知識

8-1. F 値と回折現象

被写界深度の結論から F 値を上げるとボケが少なくなることが分かりました。であれば絞りを絞るほどボケが少なくなるように思えますが実際はそうはなっていません。絞りで調節する穴の大きさ（レンズ有効直径）は所謂「スリット」と同じなので、穴に入射した光の一部はセンサー側で回折し、絞りを弱めれば穴が大きくなって回折の影響は少なくなりますが、絞りを強めすぎると回折の影響が大きくなってセンサーに届く光が減り、画質低下を引き起こしてしまいます。この現象は「小絞りボケ」と呼ばれます。

8-2. 開放 F 値

絞りが最も開いた状態を開放と呼びます。この時の F 値を開放 F 値と呼び、そのレンズで設定できる絞りの最小値です。開放 F 値が高いレンズでは暗め・ボケ少なめ、開放 F 値が低いレンズでは明るめ・ボケ多めです。この意味を少し探ってみると、F 値の定義を少し変形して（7-3 に基づき光焦距離を画焦距離に置き換えています）

$$\frac{\text{画焦距離}}{\text{F 値}} \approx \text{有効直径}$$

とすれば画焦距離が一定の時、F 値と有効直径は反比例の関係にあります。この関係から、開放 F 値が高いレンズは有効直径が小さくて開放 F 値が低いレンズは有効直径が大きいというのは、同じ画焦距離で比較していることになります。つまり理論的には「画焦距離÷F 値」が大きければ明るくてボケを出しやすいレンズです。

8-3. 最短撮影距離

（1眼レフ）カメラでは、センサーと被写体との距離が近すぎるとピンボケが避けられないという問題があります。ピンボケしないギリギリの、センサーと被写体との距離を最短撮影距離と呼び、レンズの側面に記載されています。広角レンズでは比較的近づいても大丈夫ですが、望遠レンズの場合、例えば少なくとも 1m といった距離を取らないとピントを合わせられず、カメラの設定によっては撮影できません。

8-4. ドリーズーム

ドラマやアニメで、被写体はそのままで背景だけがズームするような映像を見ることがありますが、それはドリーズームで撮影されています。ドリーズームを行うには画角を望遠に変化させながら被写体から遠ざかります。これで被写体の映像内の大きさは変わらず背景だけが変化して見えるわけです。もちろん逆も可能で、画角を広角に変化させながら被写体に近づけば逆の効果が同様に得られます。

画角を変えずに近づくあるいは遠ざかるだけの映像でも、動画編集ソフトがあれば、その映像の縮小変化あるいは拡大変化でドリーズーム動画を作れます。

8-5. AEB 撮影

露出に関する連射撮影の一種で、設定通りの露出の写真を 1 枚、やや明るい写真を 1 枚、やや暗い写真を 1 枚、この計 3 枚を自動で撮影します。この場合の撮影枚数は 3 枚ですが、5 枚や 7 枚などにも設定できます。

8-6. HDR 撮影

機能的には AEB と似ているのですが連射撮影ではありません。明暗差が激しくて白飛びや黒潰れが目立つ写真を撮影する場合などに HDR を使うと、白飛びを抑えた補正写真と、黒潰れを抑えた補正写真を自動で作成し、1 枚の写真に合成する機能です。このように明暗差の激しい写真の撮影で使える便利な機能ですが、複数枚の写真を合成するので動きのある被写体を撮影するとブレが目立ちます。補正で発色も変わる為、発色が綺麗なグルメリュウ写真や風景を撮る場合などは注意が必要です。

8-7. RAW データ形式

カメラは基本的に撮影した写真を「JPEG 形式」で保存する設定のものが多くあります。つまり画質を落として圧縮した画像を完成品として保存しています。JPEG 形式はデータが軽くて管理しやすいですが、レタッチには向いておらず、色味の修正や拡大等を行うと劣化が目立ってきます。

カメラで保存設定を「RAW」にすると、撮った写真は無圧縮の生データとして保存されます。RAW データを PC で開くには Photoshop 等のレタッチソフトが必要で、ホワイトバランスや露出を補正してから PNG や JPEG で保存すれば高品質な写真を作れます。撮った写真を後から補正する場合に便利です。ちなみにドローン空撮カメラには RAW 画像と JPEG 画像を同時に保存する RAW+JPEG という設定もあります。(RAW は JPEG に比べてファイルサイズがやや重いです)

8-8. カメラと太陽

ドローンではほぼ無いケースですが、1 眼レフの場合、特に危険なので参考のために記載します。レンズやファインダーで太陽を見るのは厳禁です。天体観測でもいわれることで、失明の恐れが高く非常に危険な行為です。

撮影において特に危険なのはレンズ口径の大きいカメラで昼の太陽を望遠撮影する場合です。肉眼で凝視しても眩しくない程度の朝日と夕日であれば太陽光線のエネルギーはまだ低く、大口径望遠でファインダーを覗いても特に問題ないようですが、昼の太陽は広角レンズと液晶画面で即座に撮影を終わらせた方が良いです。言ってしまうと液晶画面で撮影するのが一番安全です。ただしセンサーには多少のダメージや劣化への影響もあるので、カメラを太陽に向けるのは撮影時のみにした方が良いでしょう。

太陽や日食などの天体観測は失明の危険が伴うため初心者にはおすすりされていません。昼の太陽だけは絶対にファインダーで覗かないと決めた方が良いでしょう。構図が太陽光で明るすぎる場合は光量を 1/8 程度まで落とせる「ND フィルター」を使います。昼の太陽を本格的に撮影するには 1/50,000~1/100,000 まで光量を落とす ND フィルター (ND100000) が必要です。

ND フィルターを使うとシャッター速度を遅くできる為、例えば夕暮れの海を撮影すると海面が凍って見えるなど不思議な効果が得られたりします。例えば ND フィルターで光量を 1/1000 に抑えた場合、シャッター速度を 1000 倍にすれば普段の露出になる計算です。

■9. 総まとめ

ここまでの解説から下の要素について操作できるようになると撮影がより楽しくなってくるでしょう。

露出	シャッター速度・F 値・ISO 感度・露光補正・レンズの種類など
画質	ISO 感度・保存形式など
色味	ホワイトバランス
構図	画焦距離・レンズの種類
動きや静止の表現	シャッター速度
その他	被写界深度・ND フィルター・レタッチ等

(表 8)

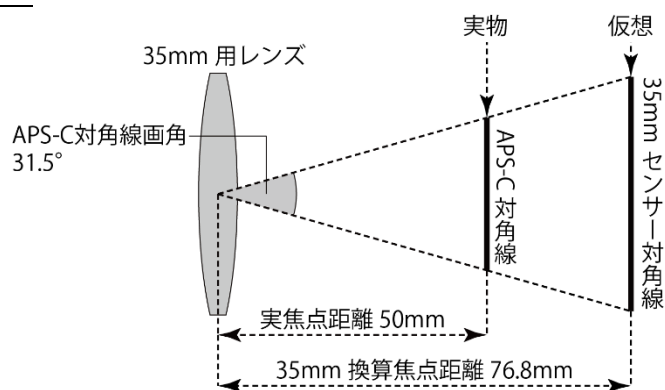
■付録

本編で図示しなかった画角やピント、35mm 換算焦点距離のしくみをここで解説します。

付録 1. 35mm 換算焦点距離の図示

35mm 換算焦点距離は 5-8 で解説しましたが、もう少し詳しい解説です。カメラの中には、カメラ本体（センサー）とレンズ（画焦距離）を付け外しできるものがあります。本体は 35mm センサー機もあれば APS-C 機といった種類があり、レンズ側にも 35mm センサー機用や APS-C 機用といった種類があります。つまり本体とレンズのマウントさえ合っていれば自由に付け替えることが出来ます。（これは例外もあるので最後に示します）。ところがここで問題が生じます。

標準的な画焦距離は一般的に 35mm センサーで 50mm と考えられているので、例えば「このレンズは 35mm 用で 50mm だよ」と聞くと標準のイメージを持ちます。しかしセンサーサイズによっては必ずしも標準ではなく、例えば APS-C 機でこのレンズを使うと画角が少し狭まる為、35mm 機で考えた仮想的な画焦距離（35mm 換算焦点距離）は少し長くなります。このことを図示したのが下図です。



(図 8)

図 8 は 35mm 用レンズを APS-C 機で使用している状態です。したがって実焦点距離は 50mm です。本来、35mm 用レンズは 35mm 機で使用するので対角線画角は 46.8° になりますが、今回は APS-C 機で使用しているため画角が少し狭まって 31.5° となっています。この状態で「画焦距離 50mm」と考えるのが問題なのは、画焦距離 50mm でありながら望遠レンズとして機能していることです。これを 35mm 機で換算した仮想的な画焦距離が「35mm 換算焦点距離」で、次の比例関係で求めることが出来ます。

$$\frac{35\text{mm 換算焦点距離}}{35\text{mm センサーサイズ}} = \frac{\text{実焦点距離}}{\text{実センサーサイズ}}$$

$$35\text{mm 換算焦点距離} = \left(\frac{35\text{mm センサーサイズ}}{\text{実センサーサイズ}} \right) \times \text{実焦点距離}$$

35mm 換算の使い所として典型的なのは、35mm 用レンズを異なる本体で使い回す場合です。特に 35mm 用レンズを APS-C 機やマイクロフォーサーズ機で使うといった「35mm 用レンズの対応センサー（35mm センサー）に比べて小さいセンサーを持つ本体で使う場合」です。

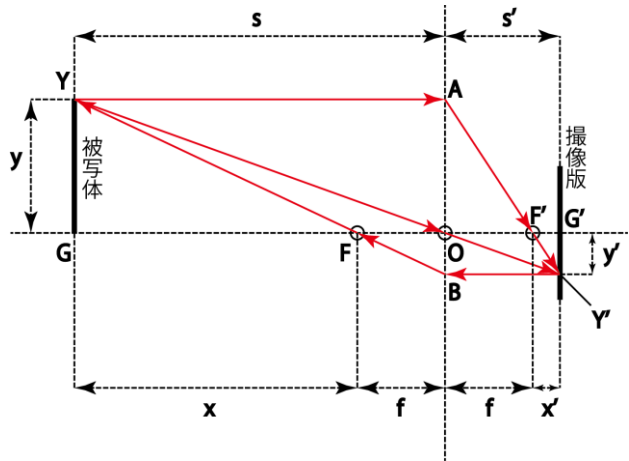
ここで分数部分には既定値があり、35mm センサーの対角線は 43.3mm、APS-C センサーの対角線は 28.2mm、マイクロフォーサーズの対角線は 21.7mm なので、35mm 用レンズを APS-C 機で使う場合の分数部分は $43.3 \div 28.2 = 1.54$ 。マイクロフォーサーズ機で使う場合の分数部分は $43.3 \div 21.7 = 2.0$ 。よって 35mm 換算焦点距離は APS-C 機で実焦点距離の約 1.5 倍、マイクロフォーサーズ機で実焦点距離の 2 倍という、よく知られた既定値が得られることになります。

最後に、この付録 1 で「カメラはレンズと本体を自由に付け替えられる」と書きましたが、例えば APS-C 用レンズを 35mm 機に付け替えるといった「レンズの対応センサーに比べて大きいセンサーを持つ本体で使う場合」を考えると、APS-C 用レンズは直径が 35mm センサーよりも小さく、写真を撮っても APS-C 用レンズの胴体に相当する「円」の中だけに被写界が写り、その周りには真っ暗になってしまいます。このことから、**35mm 用レンズの対応センサー (35mm センサー) に比べて本体のセンサーが小さくかつ、「ケラレ」(※) が無ければ 35mm 換算が使える**ことになります。

(※) ケラレ：広角レンズを使って撮影する場合に、レンズに取り付けたフィルターの枠により、画像の四隅に暗い影が出てしまうこと。

付録 2. ガウスのレンズ公式の導出

下図は図 4 と同じ内容の図です。赤い線は光の道筋で、レンズに平行に入射した光は焦点に向かいます。上側の平行光線は被写体から発せられた光で、下側の平行光線はセンサーから発せられた光です。どちらも焦点を通ります。これを使ってガウスのレンズ公式を導出してみましょう。



(図 9)

まず図 9 から以下の 3 つの相似関係が見出せます。

$$\begin{aligned} \triangle YGO &\propto \triangle Y'G'O \dots 1 \\ \triangle AOF' &\propto \triangle Y'G'F' \dots 2 \\ \triangle YGF &\propto \triangle BOF \dots 3 \end{aligned}$$

被写体の高さが y、映像の高さが y' なので、この倍率を m と定義して、

$$m = -\frac{y'}{y} \left(= -\frac{x'}{f} \right) \left(= -\frac{f}{x} \right) \left(= -\frac{s'}{s} \right)$$

です。一番目のカッコは式 2 により、二番目のカッコは式 3 により、三番目のカッコは式 1 によるものです。このうち 2 つを使って、



$$\frac{x'}{f} = \frac{s'}{s}$$

さらに図9から $s' = x' + f$ の関係があるので、

$$\frac{s' - f}{f} = \frac{s'}{s}$$

両辺を s' で割ると、

$$\frac{s' - f}{s'f} = \frac{1}{s} \rightarrow \frac{s'}{s'f} - \frac{f}{s'f} = \frac{1}{s} \rightarrow \frac{1}{f} - \frac{1}{s'} = \frac{1}{s}$$

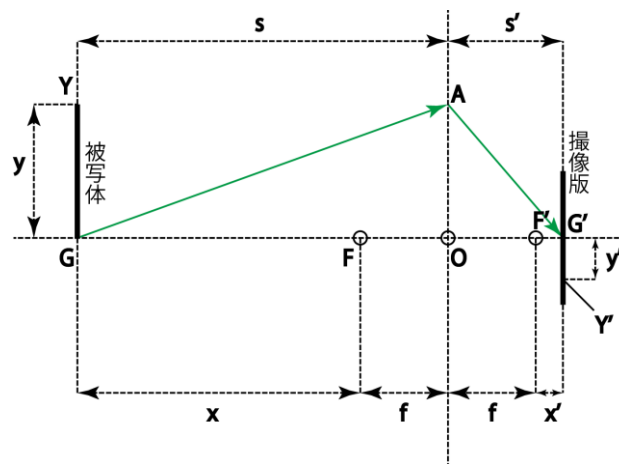
少し整理して、

$$\boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}}$$

となります。これがガウスのレンズ公式です。この式は図4～図6で示されるレンズ1枚の光学モデルで、光焦距離 f 、被写体距離 s 、画焦距離 s' を完全に結び付けられることを意味します。

付録3. ピント結線

下図は7章の被写界深度の解説で用いた図5と同じ内容の図です。

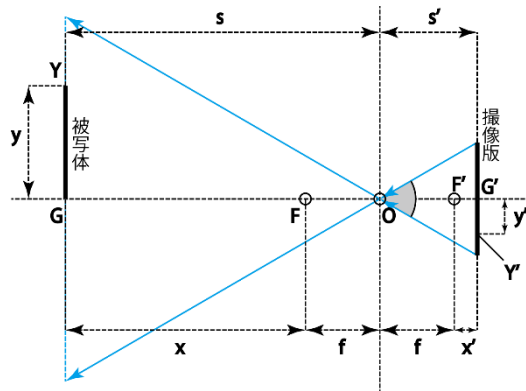


(図10)

この図では光線の道筋が斜めになっています。なぜこのような軌跡でよいのかというと、ガウスのレンズ公式によって光焦距離 f 、被写体距離 s 、画焦距離 s' の関係が定まっている為です。つまり被写体側の点 G から出た光が光軸に平行だろうと斜めだろうとセンサー側の点 G' に届くということです。光焦距離 f を変えれば s' か s が変化するので光線の軌跡も変化します。画焦距離 s' や被写体距離 s を変えても光線は変化します。

付録4. 画角結線

画角結線について下図で解説します。



(図11)

今度は点Oを中心に「X」の形をした光の軌跡が描かれています。センサーの上端と下端から出た光がレンズの中心を通って被写界に出ていく様子です。これは被写体がセンサーにどの程度収まるかを表し、例えば被写体距離sを変えなくても画焦距離s'を長くすれば被写体が大きく写ることを意味します。これが「望遠」です。

画角はどこにあるのかというと、点Oの右側に示されている灰色部分の角度です。対頂角の関係から点Oの左側も同じ画角ですが、通常は右側で考えます。センサーサイズは変わらないので、画角を狭めれば画焦距離s'が長くなり、画角を広げれば画焦距離s'が短くなります。数学的に見ると、画角の半分とセンサーサイズの半分と画焦距離s'はタンジェントで結ばれる関係にあります。

付録5. 被写界深度と画角の途中計算

式7-3と定義を再掲します。

$$D_f = \frac{\varepsilon F s^2}{s'^2} \dots 7-3$$

$$\left. \begin{matrix} \langle \varepsilon \rangle = 2\varepsilon \\ \langle s \rangle = 2s \\ \langle s' \rangle = 2s' \end{matrix} \right\} \dots 2 \text{ 倍の定義} \quad , \quad \left. \begin{matrix} 2[\varepsilon] = \varepsilon \\ 2[s] = s \end{matrix} \right\} \dots 1/2 \text{ 倍の定義}$$

①の計算

ε, s' を2倍にするには、式7-3に $\langle \varepsilon \rangle = 2\varepsilon, \langle s' \rangle = 2s'$ を代入して、

$$D_f = \frac{\frac{\langle \varepsilon \rangle}{2} F s^2}{\left(\frac{\langle s' \rangle}{2}\right)^2} = \frac{\frac{1}{2} \langle \varepsilon \rangle F s^2}{\frac{1}{4} \langle s' \rangle^2} = \frac{1}{2} \frac{4 \langle \varepsilon \rangle F s^2}{\langle s' \rangle^2} = 2 \frac{\langle \varepsilon \rangle F s^2}{\langle s' \rangle^2}$$

$$D_f = 2 \frac{\langle \varepsilon \rangle F s^2}{\langle s' \rangle^2}$$

$F = s'/D$ なので

$$F = \frac{s'}{D} = \frac{1}{D} \frac{\langle s' \rangle}{2} = \frac{\langle s' \rangle}{D} \frac{1}{2} \equiv \frac{1}{2} \langle F \rangle$$

したがって

$$D_f = 2 \frac{\langle \varepsilon \rangle \frac{1}{2} \langle F \rangle s^2}{\langle s' \rangle^2}$$

$$D_f = \frac{\langle \varepsilon \rangle \langle F \rangle s^2}{\langle s' \rangle^2}$$

$2F = \langle F \rangle$ なので、

$$D_f = \frac{\langle \varepsilon \rangle 2F s^2}{\langle s' \rangle^2}$$

$$\boxed{\frac{D_f}{2} = \frac{\langle \varepsilon \rangle F s^2}{\langle s' \rangle^2}}$$

②の計算

ε を2倍にし、 s を1/2倍するには、式7-3に $\langle \varepsilon \rangle = 2\varepsilon$, $2[s] = s$ を代入して、

$$D_f = \frac{\langle \varepsilon \rangle F (2[s])^2}{s'^2}$$

$$D_f = \frac{\frac{1}{2} 4 \langle \varepsilon \rangle F [s]^2}{s'^2}$$

$$D_f = 2 \frac{\langle \varepsilon \rangle F [s]^2}{s'^2}$$

$$\boxed{\frac{D_f}{2} = \frac{\langle \varepsilon \rangle F [s]^2}{s'^2}}$$

③の計算

ε を1/2倍にし、 s を2倍するには、式7-3に $2[\varepsilon] = \varepsilon$, $\langle s \rangle = 2s$ を代入して、

$$D_f = \frac{2[\varepsilon] F \left(\frac{\langle s \rangle}{2}\right)^2}{s'^2}$$

$$D_f = \frac{2 \frac{1}{4} [\varepsilon] F \langle s \rangle^2}{s'^2}$$

$$D_f = \frac{1}{2} \frac{[\varepsilon] F \langle s \rangle^2}{s'^2}$$

$$\boxed{2D_f = \frac{[\varepsilon] F \langle s \rangle^2}{s'^2}}$$

④の計算

s', s を2倍にするには、式7-3に $\langle s' \rangle = 2s'$, $\langle s \rangle = 2s$ を代入して、

$$D_f = \frac{\varepsilon F \left(\frac{\langle s \rangle}{2}\right)^2}{\left(\frac{\langle s' \rangle}{2}\right)^2}$$

$$D_f = \frac{\frac{1}{4} \varepsilon F \langle s \rangle^2}{\frac{1}{4} \langle s' \rangle^2}$$

$$D_f = \frac{\varepsilon F \langle s \rangle^2}{\langle s' \rangle^2}$$