解像を三つの量のどれで買うかで、焦点深度の払いが違う

— R を半分にすると焦点深度は、波長で買えば 0.500000 倍、開口数で買えば 0.250000 倍、k_1 で買えば 1.000000 倍 — 分離子は、細かさを波長で買うか、開口数で買うか、k_1 で買うか — [論文757]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

露光で描ける細かさは「波長で決まる限界」と言われる。けれど解像は、波長・開口数・プロセスの係数 k_1 の三つの積である。三つのどれで細かさを買ったかで、焦点深度が何を払うかを数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、波長より細かく描ける——ArF 液浸の代表の組で $R = 42.888889$ nm、波長の 0.222222 倍（第2節）。 第二に、解像の伸びは三つの比の積である——g 線から ArF 液浸で 0.043036 ＝ 波長 0.442661 × 開口数 0.259259 × k_1 0.375000（第3節）。 第三に、最も多く稼いだのは開口数である——対数での取り分は波長 0.259068、開口数 0.429133、k_1 0.311799（第3節）。 第四に、これが本稿の芯である。同じ半分の解像でも、焦点深度の払いが三通りに違う——波長で買えば 0.500000 倍、開口数で買えば 0.250000 倍、k_1 で買えば 1.000000 倍（第4節）。 第五に、だから焦点深度は解像より速く縮んだ——解像の比 0.043036 に対し、焦点深度の比 0.029754（第4節）。 第六に、分離子は、細かさを波長で買うか、開口数で買うか、k_1 で買うかである——「限界は波長で決まる」は、どれで買ったかを言うまで、何を失ったかが決まらない（第5節）。 キーワード：露光の解像限界、開口数、焦点深度、レイリーの式、液浸露光、解像の買い方。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——解像を $k_1\lambda/\mathrm{NA}$、焦点深度を λ/NA^2 に比例する形で書くレイリーの式、液浸で開口数が 1 を超えること、k_1 を下げる工夫が解像を伸ばすことは、いずれも既知である（マック 2007、ボルン＆ウォルフ 1999）。組は代表値である——五つの組の波長・開口数・k_1 は比べるための代表値で、実在の装置の値や世代の年表は主張しない。焦点深度は比だけを言う——係数 k_2 を 1 と置く約束のもとで計算しており、深さの絶対値ではなく比だけを主張する。k_1 の中身を扱わない——位相シフトや変形照明などの手法、k_1 を下げるとプロセスの余裕が削られることは扱わない。k_1 で買うと焦点深度が変わらないのは、この式の上での話である。工程を扱わない——ピッチの分割は算術の目安で、多重露光の工程は扱わない。既刊との関係：論文358 は、被写界深度の深さが測定値ではなく約束であることを示した——その射程注記は、回折限界の理論には立ち入らず、幾何光学の近似の上で計算すると明記していた。ここは回折で決まる解像と焦点深度の側に入り、深さの係数を約束として置いたうえで比だけを主張する。解像をどれで買うかで、深さの払いが変わる。加えたのは、五つの代表の組で解像と焦点深度を並べたこと、解像の伸び **0.043036** を三つの比に分け、対数での取り分を出したこと、解像を半分にする三つの道で焦点深度が **0.500000**・**0.250000**・**1.000000** 倍に分かれることを示したこと、分離子を「三つのどれで買うか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：波長を λ、開口数を NA、プロセスの係数を k_1 とする。描ける細かさ R と焦点深度 DOF を次の形で置く。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{\mathrm{NA}}, \qquad \mathrm{DOF} = k_2 \frac{\lambda}{\mathrm{NA}^2}, \qquad \frac{R'}{R} = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{\mathrm{NA}}{\mathrm{NA}'} \cdot \frac{k_1'}{k_1}$$

$k_2 = 1$ と置き、焦点深度は比だけを見る。

問い：描ける細かさは、何と引き換えに伸びてきたのか。

2. 波長より細かく描ける

計算 2.1：五つの代表の組で、解像と焦点深度を出した。

組	波長	開口数	k_1	解像 R	焦点深度
g 線	**436** nm	**0.35**	**0.80**	**996.571429** nm	**3559.183673** nm
i 線	**365** nm	**0.60**	**0.60**	**365.000000** nm	**1013.888889** nm
KrF	**248** nm	**0.80**	**0.40**	**124.000000** nm	**387.500000** nm
ArF	**193** nm	**0.93**	**0.35**	**72.634409** nm	**223.147185** nm
ArF 液浸	**193** nm	**1.35**	**0.30**	**42.888889** nm	**105.898491** nm

> **観察 2.2**
>
> **ArF 液浸の組は、波長の 0.222222 倍を描く。g 線の組では波長の 2.285714 倍だった——「波長の限界」は、波長そのものではなく、三つの量の積の限界である。**

3. 解像の伸びは、三つの比の積

計算 3.1：g 線から ArF 液浸への解像の比を、三つの比に分け、対数での取り分を出した。

量	比	対数での取り分
波長	**0.442661**	**0.259068**
開口数（逆数）	**0.259259**	**0.429133**
k_1	**0.375000**	**0.311799**
解像 R	**0.043036**	**1**

> **観察 3.2**
>
> **最も多く稼いだのは開口数である。三つの比の積は解像の比に差 0 で一致し、取り分の和も 1 になる——波長の短縮は伸びの四分の一ほどしか担っていない。**

4. 同じ半分でも、焦点深度の払いが違う

計算 4.1：ArF 液浸の組から、解像を半分にする三つの道を取り、焦点深度の倍率を出した。

解像を半分にする道	焦点深度
波長を半分に	**0.500000** 倍
開口数を **2** 倍に	**0.250000** 倍
k_1 を半分に	**1.000000** 倍

> **観察 4.2**
>
> これが本稿の芯である。同じ半分の解像でも、焦点深度の払いが三通りに違う。開口数は解像に一乗、焦点深度に二乗で入り、波長はどちらにも一乗で入り、k_1 は焦点深度に入らない——最も多く稼いだ開口数が、最も高く深さを払う。

> **観察 4.3**
>
> だから焦点深度は、解像より速く縮んだ。g 線から ArF 液浸で、解像の比 **0.043036** に対し、焦点深度の比は **0.029754** である——細かさの伸びの多くを開口数で買ったぶん、深さはそれ以上に失われた。

> **観察 4.4**
>
> ピッチの分割は、三つの外の道である。ArF 液浸の **42.888889 nm** のピッチを **4** つに割ると **10.722222 nm** 相当になる——式の三つの量を動かさずに細かさを得るが、その工程は本稿では扱わない。

5. 分離子

> **観察 5.1**
>
> 分離子は、細かさを波長で買うか、開口数で買うか、k_1 で買うかである。同じ半分の解像に、焦点深度は 0.500000・0.250000・1.000000 倍の三つの値を返す——「限界は波長で決まる」は、どれで買ったかを言うまで、何を失ったかが決まらない。

> **観察 5.2**
>
> 論文358 と並べる。358 は、被写界深度の深さが「見分けられる限界」という約束を含むことを示し、回折限界には立ち入らないと明記した——ここは回折で決まる側で、深さの係数 k_2 をやはり約束として 1 に置き、比だけを主張した。深さが約束を含むことは、358 の言うとおりここでも残る。

> **観察 5.3**
>
> 言わないこと。組は代表値で、実在の装置も世代の年表も、k_1 を下げる手法の中身も、多重露光の工程も扱わない——示したのは、解像の買い方で焦点深度の払いが三通りに分かれることである。

6. 点呼と結び

1. ArF 液浸 **42.888889 nm**（計算 2.1）：波長の 0.222222 倍。
2. 解像の比 **0.043036**（計算 3.1）：三つの積。
3. 波長 **0.442661**（計算 3.1）：一つ目の比。
4. 開口数 **0.259259**（計算 3.1）：二つ目の比。
5. 取り分 **0.429133**（観察 3.2）：開口数が最大。
6. 波長で買えば **0.500000** 倍（計算 4.1）：一乗の払い。
7. 開口数で買えば **0.250000** 倍（観察 4.2）：本稿の芯。
8. k_1 で買えば **1.000000** 倍（計算 4.1）：深さに入らない。
9. 焦点深度の比 **0.029754**（観察 4.3）：解像より速く縮む。
10. 三つのどれで買うか（観察 5.1）：分離子・論文358。

結び：解像を三つの量のどれで買うかで、焦点深度の払いが違う。代表の組で、g 線の **996.571429 nm** から ArF 液浸の **42.888889 nm**（波長の **0.222222** 倍）まで、解像の比 **0.043036** は波長 **0.442661**・開口数 **0.259259**・k_1 **0.375000** の積で、対数での取り分は開口数が **0.429133** と最も大きい——「波長の限界」は、三つの量の積の限界である。同じ半分の解像を買うのに、焦点深度は波長なら **0.500000** 倍、開口数なら **0.250000** 倍、k_1 なら **1.000000** 倍になる——最も多く稼いだ開口数が最も高く深さを払い、焦点深度の比は解像より小さい **0.029754** になった。分離子は、細かさを波長で買うか、開口数で買うか、k_1 で買うかである——「限界は波長で決まる」は、どれで買ったかを言うまで、何を失ったかが決まらない。既刊との位置——論文**358** は深さが約束を含むことを示し、回折には立ち入らなかった。ここは回折の側で、深さの係数を約束に置いて比だけを数えた。正直に言えば——組は代表値で、実在の装置も k_1 を下げる手法も多重露光の工程も扱っていない。

参考文献

1. Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of Optics* (7th ed.). Cambridge University Press.
2. Mack, C. (2007). *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. Wiley.
3. 山岸勇輝 (2026). 『被写界深度の「深さ」は、測定値ではなく約束である』[論文358]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697216

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)