

反射防止膜が一層では足りない理由は、二つ独立にある

— 理想の膜でも消えるのは設計波長だけで、400 nm では **0.013541** まで戻る — しかも理想の屈折率 **1.232883** をもつ材料が無く、実在する MgF_2 は設計波長でさえ **0.012601** 残す — 二つの不足は別の原因から来ている — [論文370]

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

反射防止膜は「反射を消す膜」と説明される。本稿が問うのはどこまで消えるかである——答えは一つの波長でだけ、しかも実在する材料では消えない。新しい定理も法則も主張しない。第一に、裸のガラスの反射率は **0.042580** (4.2580 パーセント) である (第2節)。第二に、理想の膜屈折率は $\sqrt{n_0 n_s} = \mathbf{1.232883}$ であり、そのとき 550 nm の反射は厳密にゼロになる (第2節)。第三に、これが本稿の芯である。同じ理想の膜でも 400 nm では **0.013541** まで戻る (第2節)。第四に、実在する MgF_2 は 1.38 で、理想と 0.1471 離れている (第3節)。第五に、そのため設計波長でさえ **0.012601** (1.2601 パーセント) 残る (第3節)。第六に、分離子は「波長がずれたか」と「屈折率がずれたか」の二つであって、一つではない (第5節)。

本稿の射程 (射程注記) : 新しい定理も法則も主張しない——単層反射防止膜・四分の一波長条件・フレネル反射はすべて既知である。薄膜光学を作らない——多層膜の設計理論 (等価膜法・最適化) には立ち入らない。名前を挙げるにとどめる。材料を扱わない—— MgF_2 以外の材料や、多孔質膜による低屈折率化は主題ではない。屈折率は波長によらないものとして扱う。斜入射を扱わない——垂直入射だけを計算する。吸収を扱わない——膜とガラスの吸収はゼロとする。偏光を扱わない——垂直入射では区別が無いので主題にしない。既刊との関係 : 論文363 は「芯」が三つあることを示した——そこでは一語が三つを指した。ここでは一つの不足が二つの原因をもつ。論文365 は定番の説明が幾何で落ちることを示した——そこでも条件を数で確かめると説明が届かなかった。論文300 は同根か別根かが判定できることを示した——波長のずれと屈折率のずれは、その基準で別根である。論文358 は約束が数を決めることを示した——ここでは「設計波長をどこに置くか」が約束である。加えたのは、理想の膜と実在の膜の反射率を七つの波長で並べたこと、理想でも 400 nm で **0.013541** に戻ることを示したこと、実在の材料が設計波長でも **0.012601** 残すことを示したこと、裸のガラスの 4.2580 パーセントを通説と照合したこと、分離子を二つに分けたことである。

1. 記法と問い

設定：空気（ $n_0 = 1.00$ ）とガラス（ $n_s = 1.52$ ）の間に、屈折率 n_1 ・光学厚さ $\lambda_0/4$ の膜を置く。

$$R_{\text{裸}} = \left(\frac{n_s - n_0}{n_s + n_0} \right)^2, \quad n_1^{\text{理想}} = \sqrt{n_0 n_s}, \quad \lambda_0 = 550 \text{ nm}$$

観察 1.1

膜は二つの反射を打ち消し合わせる。表面での反射と、膜とガラスの界面での反射——位相が半波長ずれ、かつ振幅が等しいときに、完全に消える。

観察 1.2

条件は二つある。位相の条件（厚さが $\lambda/4$ ）と、振幅の条件（ $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$ ）——どちらが崩れても消えない。

観察 1.3

そして二つは別の量で崩れる。位相は波長で、振幅は材料で——本稿はこの二つを分けて数に出す。

問い：反射防止膜は、どこまで反射を消すか。

2. 理想の膜でも、一つの波長でしか消えない

計算 2.1：理想の膜屈折率 1.232883 での反射率（本稿で計算・垂直入射）。

波長 [nm]	反射率
400	0.01354129
450	0.00517551
500	0.00108717
550	0.00000000
600	0.00075713
650	0.00254063
700	0.00482796

裸のガラスは 0.042580（4.2580 パーセント）である。

観察 2.2

これが本稿の芯である。550 nm では厳密にゼロだが、400 nm では 0.013541 まで戻る——裸の 0.042580 の三分の一近くである。

観察 2.3

設計波長の両側で増える。500 nm で 0.00108717、600 nm で 0.00075713——山ではなく谷であって、頂点は一点しかない。

観察 2.4

短波長側のほうが悪い。400 nm で 0.013541、700 nm で 0.004828——同じだけ離れても対称ではない。位相のずれが $1/\lambda$ で効くからである。

観察 2.5

裸のガラスの 4.2580 パーセントは通説と一致する。ガラス一面の反射は約 4 パーセントとされる——式も定数も外していない。

3. そして理想の材料が無い

計算 3.1：実在する MgF_2 ($n_1 = 1.38$) での反射率（本稿で計算）。

波長 [nm]	MgF_2	理想膜
400	0.02205252	0.01354129
450	0.01620430	0.00517551
500	0.01335683	0.00108717
550	0.01260079	0.00000000
600	0.01312726	0.00075713
650	0.01436835	0.00254063
700	0.01596197	0.00482796

観察 3.2

MgF_2 は設計波長でもゼロにならない。0.012601、すなわち 1.2601 パーセント——位相の条件は満たしているのに、振幅の条件が満たされていない。

観察 3.3

理想の屈折率は 1.232883 である。 $\sqrt{1.52}$ —— MgF_2 の 1.38 とは 0.1471 離れている。これほど低い屈折率をもつ緻密な固体が無い。

観察 3.4

それでも膜は効いている。裸の 0.042580 から 0.012601 へ、三分の一以下——「効かない」のではなく「消し切れない」のである。

観察 3.5

二つの不足は独立である。理想材料があれば波長のずれだけが残る、単色光なら材料のずれだけが残る——片方を直しても、もう片方は残る。

観察 3.6

論文300の基準で別根である。位相のずれは幾何（厚さと波長）から、振幅のずれは材料（屈折率）から出る——どちらも「反射が残る」という同じ症状を作るが、根が違う。

4. 多層にすると何が変わるか

観察 4.1

層を増やすと、消せる波長が増える。二層なら二波長、三層ならさらに広い帯域——位相の条件を複数の波長で同時に満たせるようになる。

観察 4.2

同時に、材料の制約も緩む。組み合わせで実効的な屈折率を作れる——一層では材料そのものが 1.232883 でなければならないが、多層ではその必要が無い。

観察 4.3

つまり多層化は二つの不足を同時に緩める。一つの操作が二つの問題に効く——だから実際のレンズは多層膜になっている。

観察 4.4

正直に言えば——本稿は多層膜を計算していない。層数を増やせば良くなることは既知として述べるにとどめる——本稿が数で出したのは一層の場合だけである。

観察 4.5

それでも一層の限界を数で知る意味はある。400 nm で 0.013541、設計波長で 0.012601——「なぜ多層が要るのか」への答が、この二つの数である。

5. 分離子：位相か、振幅か

観察 5.1

分離子——崩れたのが位相の条件か、振幅の条件か。

崩れた条件	何で崩れる	550 nm で	400 nm で
どちらも満たす（理想膜）	—	0.000000	0.013541
位相だけ崩れる	波長	0.000000	0.013541
振幅だけ崩れる（MgF ₂ ）	材料	0.012601	0.022053

観察 5.2

三行目は 550 nm でも残る。二行目は 550 nm ではゼロである——設計波長での値を見れば、どちらの条件が崩れているかが分かる。

観察 5.3

つまり症状から原因を切り分けられる。設計波長で残る量が材料の不足、そこから離れて増える量が波長の不足——同じ「反射が残る」を二つに分解できる。

観察 5.4

分離子は動かせる。設計波長を 400 nm に置き直せば、そこがゼロになる——どこを完璧にするかは選べる。だが「全部を完璧に」は一層では選べない。

観察 5.5

正直に言えば——0.013541 も 0.012601 も、 $n_s = 1.52 \cdot \lambda_0 = 550 \text{ nm}$ ・屈折率が波長によらないという明示した条件の上での値である。別のガラスなら別の数が出る——動かないのは、位相と振幅の二条件が別の量で崩れるという構造だけである。

観察 5.6

最後に一つ——一つの症状に二つの原因があるとき、片方を完全に直しても症状は消えない。理想材料が見つかって、400 nm の 0.013541 は残る——原因を数え間違えると、直したのに効かなかったことを技術の不足と取り違える。

6. 点呼と結び

1. 裸のガラスは 0.042580 (計算 2.1) : 通説の 4 パーセントと一致。
2. 理想の膜屈折率は 1.232883 (観察 3.3) : $\sqrt{1.52}$ 。
3. 理想膜は 550 nm で厳密にゼロ (計算 2.1) : 二条件が揃う。
4. 同じ膜が 400 nm で 0.013541 (計算 2.1) : 裸の三分の一近く。
5. 両側で増える (観察 2.3) : 頂点は一点しかない。
6. 短波長側のほうが悪い (観察 2.4) : 位相が $1/\lambda$ で効く。
7. MgF_2 は 1.38 (観察 3.3) : 理想と 0.1471 離れる。
8. 設計波長でも 0.012601 残る (観察 3.2) : 振幅の条件が崩れている。
9. それでも三分の一以下 (観察 3.4) : 消し切れないだけ。
10. 二つの不足は独立 (観察 3.5) : 片方を直しても残る。

結び：反射防止膜は「反射を消す膜」と説明される——だが消えるのは、二つの条件が同時に満たされたときだけである。条件は位相と振幅の二つある——厚さが $\lambda/4$ であることと、屈折率が $\sqrt{n_0 n_s}$ であること。そして二つは別の量で崩れる——位相は波長で、振幅は材料で。理想の膜でも、一つの波長でしか消えない——屈折

率 **1.232883** の理想膜は **550 nm** で厳密にゼロになるが、**400 nm** では **0.013541** まで戻る。裸のガラスの **0.042580** (**4.2580** パーセント、通説の **4** パーセントと一致) の三分の一近くである。設計波長の両側で増える谷であって、頂点は一点しかない。同じだけ離れても短波長側のほうが悪いのは、位相のずれが $1/\lambda$ で効くからである。そのうえ、理想の材料が無い—— $\sqrt{1.52} = 1.232883$ ほど低い屈折率をもつ緻密な固体が無く、実在する MgF_2 は **1.38** で **0.1471** 離れている。そのため位相の条件を満たしている **550 nm** でさえ **0.012601** (**1.2601** パーセント) 残る。それでも裸の **0.042580** から三分の一以下には落ちているので、「効かない」のではなく「消し切れない」のである。二つの不足は独立である——理想材料があれば波長のずれだけが残る、単色光なら材料のずれだけが残る。片方を直しても、もう片方は残る。論文300の基準で別根であって、位相のずれは幾何から、振幅のずれは材料から出る。分けているものは一つ——崩れたのが位相の条件か、振幅の条件か。設計波長で残る量が材料の不足、そこから離れて増える量が波長の不足であって、同じ「反射が残る」を二つに分解できる。設計波長を **400 nm** に置き直せばそこがゼロになるので、どこを完璧にするかは選べる。だが「全部を完璧に」は一層では選べない。正直に言えば——本稿は多層膜を計算していない。層を増やせば消せる波長が増え、同時に材料の制約も緩むので、一つの操作が二つの問題に効く——だからレンズは多層膜になっている。その理由が、ここで出した二つの数である。最後に一つ——一つの症状に二つの原因があるとき、片方を完全に直しても症状は消えない。理想材料が見つかって **400 nm** の **0.013541** は残る。原因を数え間違えると、直したのに効かなかったことを技術の不足と取り違える。

参考文献

1. Rayleigh, Lord (1886). On the Intensity of Light Reflected from Certain Surfaces at Nearly Perpendicular Incidence. *Proceedings of the Royal Society of London*.
 2. Macleod, H. A. (2010). *Thin-Film Optical Filters* (4th ed.). Boca Raton: CRC Press.
 3. Born, M., Wolf, E. (1999). *Principles of Optics* (7th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
 4. Raut, H. K., Ganesh, V. A., Nair, A. S., Ramakrishna, S. (2011). Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. *Energy & Environmental Science*.
 5. Hecht, E. (2016). *Optics* (5th ed.). Boston: Pearson.
 6. 山岸勇輝 (2026). 『第三百回の点呼——同根か別根かは判定できる』[論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
 7. 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
 8. 山岸勇輝 (2026). 『バットの「芯」は三つあり、同じバットの上で 23 cm 離れている』[論文363]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697505
 9. 山岸勇輝 (2026). 『ブラジルナッツ効果の定番の説明は、隙間の大きさで落ちる』[論文365]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697622
-

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

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