

1 IPS 光学補償フィルム構成の最適化

本節では、IPS パネルの光学補償フィルム構成 POL/LC/A/C/ANA における CR 視野角の最適化について述べる。ここで、POL は入射側偏光板 (偏光子,polarizer)、LC は液晶、A は A-plate, C は C-plate, ANA は出射側偏光板 (検光子,analyzer) である。尚、LC の長軸と POL の吸収軸を平行とする E モードで偏光板同士はクロスニコル条件である。最適化においては、特定の視点 ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 45^\circ$) における、コントラスト比 $CR(\theta, \phi)$ に関する ReA-ReC 平面上での、best 条件を探索する。そして、best 条件において (θ, ϕ)-極座標プロット (polar plot) を用いて CR の視野角マップを作成し、REF (A/C なし : Pol/LC/Analyzer) と比較することで、CR 視野角の拡大を確認する。さらに Stokes 解析の結果に基づき、偏光板の「オフ軸クロスニコルずれ」を補償する光学補償の設計思想の説明を行う。なお、構成は POL/LC/A/C/ANA で E モード配置としたが、POL/C/A/LC/ANA で O モード配置 (O モードは LC の長軸と POL の透過軸を平行とする), POL/C/A/LC/A/C/ANA で E モード/O モード配置の構成の場合も補償設計の思想は同様である。

1.1 計算条件（探索格子と評価量）

探索パラメータは A-plate の有効リターデーション (ReA) と C-plate の有効リターデーション (ReC) である。今回の探索条件は以下の通りである。

- 構成 : POL/LC/A/C/ANA
- 偏光板 : クロスニコル条件 $\alpha_{\text{pol,in}} = 0.0^\circ$, $\alpha_{\text{pol,out}} = 90.0^\circ$
- LC : リターデーション $ReLC = 310$ nm, E モード, 光学軸 $\alpha_{\text{LC}} = 2.5^\circ$,
- A-plate: リターデーション $ReA \in [0, 372]$ nm, 光学軸 $\alpha_A = 2.5^\circ$
- C-plate: リターデーション $ReC \in [-280, 280]$ nm
- 最適化すべき評価指標 : $CR(\theta = 30^\circ, \phi = 45^\circ)$, および $CR(\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ)$

1.2 最適化が想定している波長

本プログラムにおける最適化 (progress における best 判定, および基本の CR 評価) は, 単色 $\lambda = 550$ nm に固定された評価ではなく, 代表波長

$$\lambda_B = 450 \text{ nm}, \quad \lambda_G = 546 \text{ nm}, \quad \lambda_R = 610 \text{ nm}$$

を用いた白色 (W) 評価として定義されている。白色評価は, 各波長の暗状態リーク透過率 $T_{\text{leak}}(\theta, \phi; \lambda)$ を重み付き平均して

$$T_{\text{leak}}^{(W)}(\theta, \phi) = \frac{\sum_{k \in \{B, G, R\}} w_k T_{\text{leak}}(\theta, \phi; \lambda_k)}{\sum_{k \in \{B, G, R\}} w_k}$$

とし (デフォルトでは $w_B = w_G = w_R = 1$), この $T_{\text{leak}}^{(W)}$ から白色コントラスト比

$$\text{CR}^{(W)}(\theta, \phi) = \frac{T_{\text{bright}}^{(W)}(\theta, \phi)}{T_{\text{leak}}^{(W)}(\theta, \phi)}$$

を構成する方式である. ここで重要なのは, 白色評価が $\text{CR}(\theta, \phi; \lambda)$ を波長平均した量ではなく, T_{leak} を平均してから CR を定義する点である. したがって, 「最適化は $\lambda = 550 \text{ nm}$ で行った」という理解は実装上は正確ではなく, より正確には「 $\lambda_G = 546 \text{ nm}$ を含む B/G/R ($450/546/610 \text{ nm}$) の白色評価を目的関数として最適化した」と解釈されるべきである.

1.3 最適化結果

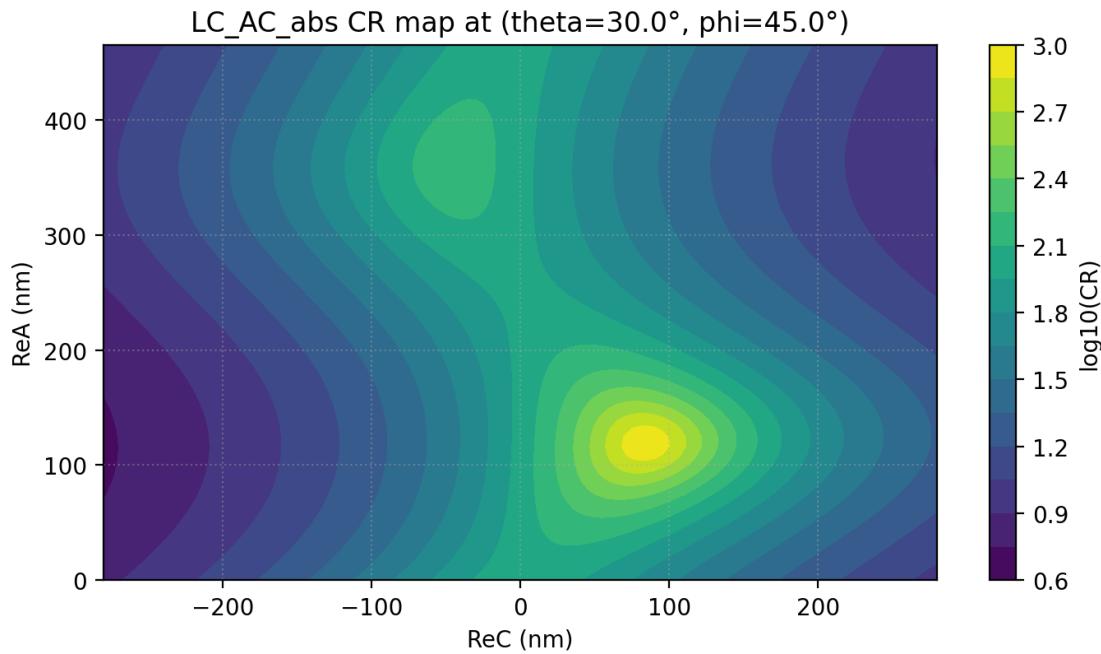


図 1: ターゲット視点での $CR(\theta=30^\circ, \phi=45^\circ)$ ReA–ReC 2 次元マップ

図 1 は ReA–ReC 2 次元マップを示し、各格子点 (ReA, ReC) に対してターゲット視点での $CR(\theta=30^\circ, \phi=45^\circ)$ を計算し、等高線として可視化したものである (デフォルトでは $\log_{10} \text{CR}$ 表示).

2 次元格子全体で最大の CR を与える条件 (global best) は次である :

$\text{ReA} = 116.25 \text{ nm}, \quad \text{ReC} = 85 \text{ nm}, \quad \text{CR}(30^\circ, 45^\circ) = 9.097 \times 10^2$

最適条件における主要指標は次である :

- ターゲット視点 $(30^\circ, 45^\circ)$:

$$\text{CR}_{\text{LC-only}} = 1.079 \times 10^2, \quad \text{CR}_{\text{best}} = 9.097 \times 10^2,$$

$$\text{改善率} = \text{CR}_{\text{best}} / \text{CR}_{\text{LC-only}} \approx 8.43$$

- 正面 ($CR00$) : 両者はほぼ同等

$$CR00_{\text{LC-only}} \approx 1.975 \times 10^4, \quad CR00_{\text{best}} \approx 1.976 \times 10^4$$

したがって、補償は正面の明暗を損なわずに、オフ軸の暗状態リークを低減し、視野角全体の低 CR 領域を押し上げる効果を持つ。尚、ReC を各 ReA で最適化した包絡線 $\text{CR}_{\text{max}}(\text{ReA})$ には主ピーク以外に第 2 ピークが存在する。REF (Pol/LC/Analyzer), best 条件、および第 2 ピーク条件における最適化指標である正面 $CR00$ とターゲット視点 $CR(\theta = 30^\circ, \phi = 45^\circ)$ の比較を表 1 に示す。

表 1: REF (Pol/LC/Analyzer), best 条件、および第 2 ピーク条件における正面 $CR00$ とターゲット視点 $CR(\theta = 30^\circ, \phi = 45^\circ)$ の比較。

条件	構造	ReA [nm]	ReC [nm]	$CR(\theta=0^\circ, \phi=0^\circ)$	$CR(\theta=30^\circ, \phi=45^\circ)$
ref	only LC	—	—	1.9752×10^4	1.0789×10^2
best (第 1 ピーク)	LC/A/C	116.25	85	1.9763×10^4	9.0971×10^2
第 2 ピーク	LC/A/C	364.25	-45	4.1561×10^4	1.5097×10^2

主ピークと第 2 ピークの物理解釈は以下の通りである。本系の補償は、オフ軸で発生する「偏光子・検光子の実効クロス条件の崩れ」を、A-plate と C-plate の位相回転 (Poincaré 球上の回転) で打ち消す問題として理解できる。主ピーク ($ReA \sim 116$ nm, $ReC \sim 85$ nm) は、比較的小さな総位相遅れで「オフ軸で増加した analyzer 軸の実効回転」を補正し、出射偏光をほぼ線偏光のまま analyzer と直交に戻す枝である。第 2 ピーク ($ReA \sim 364$ nm, $ReC \sim -45$ nm) は、より大きな ReA により Poincaré 球上で一度大きく回転してから別の方位で直交条件に近づく（「回り込み」）枝に相当し、局所的に CR を回復するが、主ピークほど強くはない。2 次元等高線では主ピークの近傍に鋭い高 CR 領域が形成され、第 2 ピークは ReA 大側に広がりのある丘として現れる。

1.4 best 条件と参照 (Pol/LC/Analyzer) の ISO-CR 比較

POL/LC/A/C/ANA 構成の best 条件と光学補償なし (POL/LC/ANA) の ISO-CR 図の定性的比較を Fig 3 に示す。

■REF (LC-only) Fig 3 (a) では、特定方位角にリークの強いロープが現れ、等高線が歪む (CR が急落する)。これはオフ軸で偏光子・検光子の実効軸が理想クロスから外れ、暗状態でも analyzer 透過成分が残ることに起因する。

■best (LC/A/C) Fig 3 (b) では、ターゲット方位 ($\phi \approx 45^\circ$) 近傍の CR が大きく押し上がると同時に、低 CR ロープが緩和され、等高線がより滑らかに広がる。これにより CR 視野角が改善する。

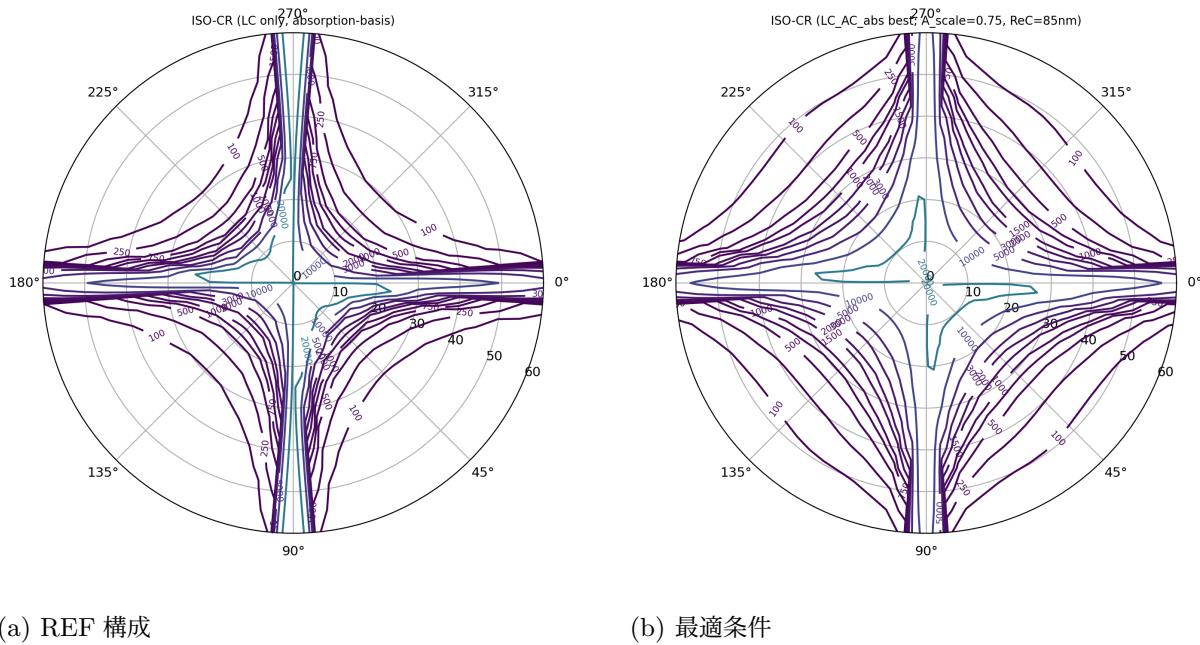


図 2: ISO-CR 比較. (a) 補償なしの REF 構成、(b) A/C プレートによる最適化後。

1.5 Stokes 解析による「オフ軸クロスニコルズ」の説明

POL/LC/A/C/ANA 構成において、偏光状態を（規格化）Stokes パラメータにより解析する。C-plate 出射後の偏光状態の Stokes パラメータは

$$(s_1, s_2, s_3) = (0.9655, 0.2460, 5.1 \times 10^{-4}),$$

であり $s_3 \approx 0$ より、ほぼ直線偏光である。この時、ターゲット視点の CR ($\theta = 30^\circ, \phi = 45^\circ$) が最大化する理由を以下に説明する。

■オフ軸でクロスニコル条件が崩れる理由 正面入射では、理想的に Pol と Analyzer を 90° 直交（クロスニコル）に置けば、暗状態で透過は抑圧される。しかしオフ軸では、O-type 偏光子・検光子の実効透過軸は波数ベクトル \hat{k} と吸収軸 c により

$$o = \frac{\hat{k} \times c}{\|\hat{k} \times c\|}$$

で与えられる横波成分へ投影されるため、実効的な透過軸が視線方向に依存して回転する。その結果、「名目上のクロスニコル（90°）」から外れ、本視点では analyzer 実効軸の方位が

$$\alpha = 98.213^\circ$$

までずれる (=クロス角が広がる).

■A-plate + C-plate による補償の本質：出射偏光の回転 暗状態のリーグは概ね「analyzer 実効軸」と「スタック出射偏光」の非直交成分で決まる。ここで出射偏光がほぼ線偏光 ($s_3 \approx 0$) であるとき，Stokes から線偏光方位 ψ は

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{s_2}{s_1} \right)$$

で与えられる。今回，最適化された A/C 補償により

$$\psi = 7.148^\circ$$

だけ出射偏光が回転し，

$$\Delta = (\alpha - \psi) \bmod 180^\circ = 91.065^\circ$$

となって analyzer とほぼ直交（理想 90° ）へ戻されている。すなわち，A-plate + C-plate は正面視点では CR に影響を与えることなく，かつ，ターゲット視点では「オフ軸で増加したクロス角（ 98.2° ）」を，出射偏光側の回転（ ψ の生成）によって打ち消し，直交条件へ近づけていると解釈できる。

1.6 結論

- POL/LC/A/C/ANA の光学補償における best 条件は

$$ReA = 116.25 \text{ nm}, ReC = 85 \text{ nm}, CR = 9.10 \times 10^2$$

で与えられた。

- best 条件は LC-only (Pol/LC/Analyzer) に対し，ターゲット視点の CR を約 8.4 倍改善し，ISO-CR の極座標プロットにおいても，CR ≥ 100 の領域が広がり CR 視野角特性が大きく改善した。
- Stokes 解析より，オフ軸で analyzer 実効軸が $\alpha = 98.2^\circ$ まで回転してクロス条件が崩れるが，A-plate + C-plate により出射偏光方位が $\psi \simeq 7.14^\circ$ 生成され， $\Delta \simeq 91.06^\circ$ として直交条件へ戻すことでリーグを低減していることが説明できる。

2 A-plate と Analyzer 連動貼りずれに対する IPS 光学補償の感度と方位非対称性評価

2.1 要旨

IPS 液晶セルの光学補償スタック POL/LC/A/C/ANA (E-mode, abs) において，最適条件 (best 近傍) を中心に A-plate と Analyzer を同一角度 Δ だけ連動回転させたときの，正面暗状態 CR00 の劣化と，斜め視点 $\theta = 30^\circ$ における $\phi = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ の方位非対称性を定量評価する。連動回転は「相対角を保ったまま系全体が回る」誤差モデルであり，単独 misalignment と比べて方位非対称を抑制できる点が存在する一方，正面暗状態の劣化を伴う場合がある。本研究ではペア非対称指標 A_{45}, A_{135} を導入し，公差設計における CR00 と方位非対称のトレードオフを整理した。

2.2 背景と目的

IPS ではオフ軸で偏光子・検光子の実効透過軸が視線方向に依存して回転し、暗状態リーケークが増加してコントラスト比 $CR(\theta, \phi)$ が低下する。A-plate + C-plate による光学補償は、Poincaré 球上の回転として理解でき、オフ軸で崩れた直交条件を出射偏光側の回転で打ち消すことでターゲット視点（例： $\theta = 30^\circ, \phi = 45^\circ$ ）の CR を改善する。

しかし実装ではフィルム貼り合わせや偏光板貼りで貼りずれが生じる。貼りずれの影響は正面暗状態 CR00 の低下として現れるだけでなく、方位角 ϕ の符号反転に対する非対称（例： $CR_{30,+45} \neq CR_{30,-45}$ ）としても現れ得る。本稿の目的は、A-plate と Analyzer を同一角度で連動回転させる誤差モデル (A_polout) に対し、

- $CR00(\Delta)$ の感度
- $\theta = 30^\circ$ における $\phi = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ の方位非対称の感度

を同時に評価し、公差議論に必要な指標を整理することである。

2.3 評価条件と指標

■中心条件 (best 近傍) 中心条件は最適化結果 (best 近傍) であり、

$$ReA = 116.25 \text{ nm}, \quad ReC = 85 \text{ nm}$$

を用いる。偏光板は $pol_in = 0^\circ, pol_out = 0^\circ$ とし、LC と A の基準方位オフセットを

$$relLC \simeq 0.25^\circ, \quad relA \simeq 0.25^\circ$$

とする。LC のリタデーションは

$$ReLC = dn \cdot d = 310 \text{ nm}$$

で一定である。

2.4 連動回転 (A_polout)

出射側偏光板に貼りずれが生じた状態を模擬するため、A-plate と Analyzer を同一角度 Δ だけ回転させる：

$$\alpha_A \rightarrow \alpha_A + \Delta, \quad \alpha_{out} \rightarrow \alpha_{out} + \Delta,$$

尚、C-plate は面内方向は等方のため、回転角には定義されない。POL 入射側、LC は固定とする。
掃引条件は

$$\Delta \in \{-3.0^\circ, -2.5^\circ, \dots, +2.5^\circ, +3.0^\circ\} \quad (\Delta_{step} = 0.5^\circ).$$

■方位非対称性指標 オフ軸の 4 方位を

$$CR_{30,\phi}(\Delta) \equiv CR(\theta = 30^\circ, \phi; \Delta), \quad \phi \in \{+45^\circ, -45^\circ, +135^\circ, -135^\circ\}$$

と定義する。土 ϕ のペア非対称を dB で

$$A_\phi(\Delta) = 10 \log_{10} \left(\frac{CR_{30,+45}(\Delta)}{CR_{30,-45}(\Delta)} \right), \quad (\phi = 45^\circ, 135^\circ)$$

とする。 $A_\phi = 0$ は方位対称であり、 $|A_\phi|$ が大きいほど非対称が強い。

2.5 結果

■中心 ($\Delta = 0$) での CR と初期非対称 中心条件 ($\Delta = 0$) では、

$$\begin{aligned} CR00(0) &= 1.976 \times 10^4, \\ CR_{30,+45}(0) &= 9.097 \times 10^2, \quad CR_{30,-45}(0) = 7.166 \times 10^2, \\ CR_{30,+135}(0) &= 7.166 \times 10^2, \quad CR_{30,-135}(0) = 9.097 \times 10^2. \end{aligned}$$

したがって

$$A_{45}(0) = +1.036 \text{ dB}, \quad A_{135}(0) = -1.036 \text{ dB}.$$

すなわち best 近傍条件でも、 $\theta = 30^\circ$ の 4 方位 CR は完全対称ではなく、約 1 dB 程度の初期非対称が存在する。

2.6 $\Delta \in [-3^\circ, +3^\circ]$ 全点の数値 (表 1)

表 2 に $\Delta \in [-3^\circ, +3^\circ]$ の全点での CR00 と $CR_{30,\phi}$ 、および A_{45}, A_{135} を示す。負側 ($\Delta < 0$) では $A_{45} > 0$ (すなわち $CR_{30,+45} > CR_{30,-45}$) が増大し、正側 ($\Delta > 0$) では $A_{45} < 0$ に反転する。同様に A_{135} は符号が反転し、 $\pm 45^\circ$ と $\pm 135^\circ$ の非対称が対になって入れ替わることが分かる。

■方位対称化点 ($\Delta \simeq +0.5^\circ$) と CR00 の挙動 表 2 より、 $\Delta = +0.5^\circ$ では

$$A_{45} \approx 0, \quad A_{135} \approx 0$$

となり、 $\theta = 30^\circ$ における 4 方位の CR がほぼ対称化される。一方で CR00 は

$$CR00(0) = 19762.9 \rightarrow CR00(0.5^\circ) = 16874.5$$

と低下する。すなわち、運動回転には「方位非対称を弱める Δ 」が存在し得る一方、それが必ずしも正面暗状態の最適条件と一致しないことが示される。

表 2: A-plate と Analyzer 連動回転 (A_polout) における全スキャン点 ($\Delta = -3^\circ \dots +3^\circ$) の結果. CR は白色 (W) 評価.

Δ [deg]	CR00	CR _{30,+45}	CR _{30,-45}	CR _{30,+135}	CR _{30,-135}	A_{45} [dB]	A_{135} [dB]
-3.0	626.51	563.27	253.64	253.64	563.27	3.465	-3.465
-2.5	870.54	681.45	301.55	301.55	681.45	3.541	-3.541
-2.0	1286.86	808.41	360.91	360.91	808.41	3.502	-3.502
-1.5	2077.35	922.12	433.60	433.60	922.12	3.277	-3.277
-1.0	3821.27	989.75	520.19	520.19	989.75	2.794	-2.794
-0.5	8468.54	985.08	617.71	617.71	985.08	2.027	-2.027
+0.0	19762.91	909.71	716.61	716.61	909.71	1.036	-1.036
+0.5	16874.54	791.71	798.88	798.88	791.71	-0.039	0.039
+1.0	6941.33	663.58	842.18	842.18	663.58	-1.035	1.035
+1.5	3278.85	546.06	831.96	831.96	546.06	-1.829	1.829
+2.0	1845.11	447.17	772.16	772.16	447.17	-2.372	2.372
+2.5	1169.65	367.34	682.04	682.04	367.34	-2.687	2.687
+3.0	803.96	304.01	583.15	583.15	304.01	-2.829	2.829

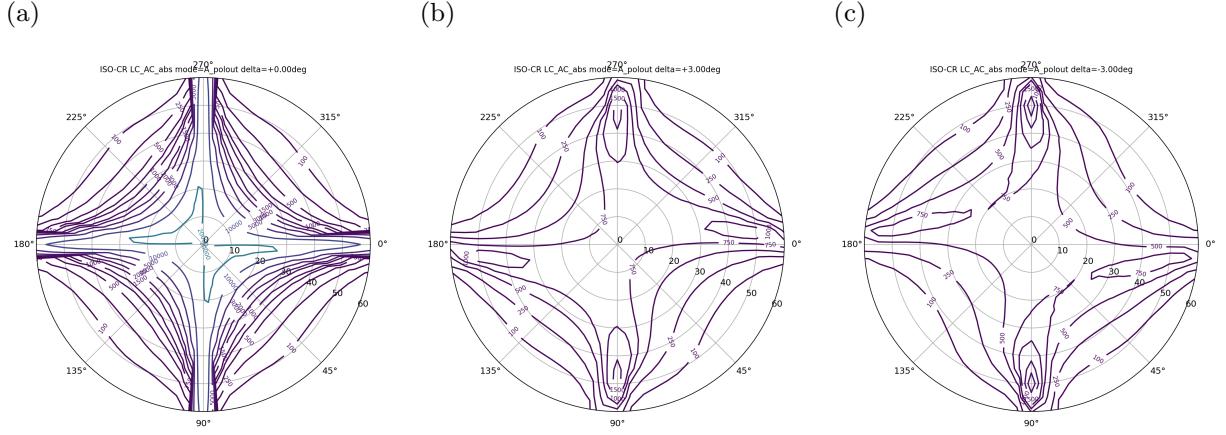


図 3: A+Analyzer 連動回転における ISO-CR 比較. (a) 回転量 $\Delta = 0^\circ$, (b) $\Delta = 3^\circ$, (c) $\Delta = -3^\circ$,

■符号依存性 ($\Delta > 0$ と $\Delta < 0$) 負側 ($\Delta < 0$) では A_{45} が $+3$ dB 超まで増大し得るのに対し, 正側 ($\Delta > 0$) では A_{45} が負へ反転し, -2.8 dB 程度まで変化する. これは「貼りずれの符号」により, $\pm\phi$ の優劣が入れ替わることを意味する. 連動回転は相対角を保存するため単回転より挙動が滑らかになり得るが, 符号依存性は残り, 工程の系統オフセット (片寄り) を含めて管理する必要がある.

2.7 結論

A-plate と Analyzer の連動貼りずれ (A_polout) に対し,

- best 近傍条件でも, $\theta = 30^\circ$ の 4 方位 CR は完全対称ではなく, 中心で $A_{45}(0) \simeq +1.04$ dB, $A_{135}(0) \simeq -1.04$ dB の初期非対称が存在する.
- $\Delta = +0.5^\circ$ では $A_{45} \approx A_{135} \approx 0$ となり方位対称化される一方, CR00 は中心より低下する.
- Δ の符号により $CR_{30,+\phi}$ と $CR_{30,-\phi}$ の優劣が反転し, $|A_{45}|, |A_{135}|$ は最大で約 3.5 dB 程度まで増大し得る. 従って公差設計では CR00 と $\min CR_{30,\phi}$ に加え, A_{45}, A_{135} を併用して方位非対称も同時に管理することが重要である.

3 波長依存性評価 (Dispersion: mono & W-ISO)

本節では, 最適化で得た補償条件 ($ReA = 116.25$ nm, $ReC = 85$ nm) を固定したまま, 単色波長 λ を掃引し, (i) 正面暗状態 $CR00(\lambda)$ と, (ii) 斜め視点 $\theta = 30^\circ$ における 4 方位平均

$$\overline{CR}_{30}(\lambda) \equiv \frac{1}{4} \left(CR(30, +45; \lambda) + CR(30, -45; \lambda) + CR(30, +135; \lambda) + CR(30, -135; \lambda) \right)$$

の波長依存性を評価する. ここで $CR00(\lambda)$ は単色 (mono) 評価, $\overline{CR}_{30}(\lambda)$ も同様に単色 (mono) 評価である. また ISO 分布として, 代表波長 B/G/R (450/546/610 nm) の単色 ISO と, B/G/R のリーク透過率平均に基づく白色 (W) ISO を併記し, 波長による分布変化を視覚的に示す.

3.1 評価条件

波長掃引は

$$\lambda \in \{450, 470, \dots, 650\} \text{ nm} \quad (\Delta\lambda = 20 \text{ nm})$$

で行い, 分散モデルは flat (材料の $\Delta n(\lambda)$ の分散を入れず, 主として位相遅れが $\Gamma(\lambda) \propto 1/\lambda$ により波長依存するモデル) を用いた. このとき短波長側ほど位相回転量が大きくなり, 補償条件が波長とともに過補償／不足補償へ移行し得る.

3.2 数値結果 (表)

表 3 に, 波長ごとの $CR00(\lambda)$ と 4 方位平均 $\overline{CR}_{30}(\lambda)$, ならびに内訳として $CR(30, \phi; \lambda)$ ($\phi = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$) を示す. 本表は dispersion_summary_CRawg4.csv 相当であり, 以降の議論は本表に基づく.

3.3 波長依存プロット (図)

図 4 は $CR00(\lambda)$ と $\overline{CR}_{30}(\lambda)$ の波長依存性を示す (plot_lambda_vs_CR00_and_CRawg4_mono.png). なお図は別途作成するため, 本稿では挿入箇所のみを示しコメントアウトする.

図 4 (および表 3) から, $CR00(\lambda)$ と $\overline{CR}_{30}(\lambda)$ はいずれも顕著な波長依存性を持つが, 依存の傾向は互いに大きく異なることが分かる. 具体的には, 正面暗状態は

$$CR00(450 \text{ nm}) \approx 1.08 \times 10^4 \rightarrow CR00(650 \text{ nm}) \approx 1.44 \times 10^4$$

表 3: 波長掃引における単色評価 (mono) のまとめ (dispersion_summary_CRawg4.csv 相当).
 $\text{CR00}(\lambda)$ と $\overline{\text{CR}}_{30}(\lambda)$, および $\theta = 30^\circ \cdot \phi = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ の各 CR を示す.

λ [nm]	CR00	$\overline{\text{CR}}_{30}$	CR(30, +45)	CR(30, -45)	CR(30, +135)	CR(30, -135)
450	10800.9	4912.95	2702.37	7123.54	7123.54	2702.37
470	11048.7	8367.11	11739.44	4994.78	4994.78	11739.44
490	11335.0	8814.77	15600.25	2029.29	2029.29	15600.25
510	11652.8	2656.84	4251.86	1061.82	1061.82	4251.86
530	11996.5	1252.88	1835.71	670.04	670.04	1835.71
550	12361.8	762.46	1049.99	474.93	474.93	1049.99
570	12745.2	531.83	700.44	363.21	363.21	700.44
590	13143.9	403.11	513.43	292.79	292.79	513.43
610	13555.3	323.00	400.77	245.20	245.20	400.77
630	13977.4	269.21	327.10	211.33	211.33	327.10
650	14408.4	231.08	275.94	186.22	186.22	275.94

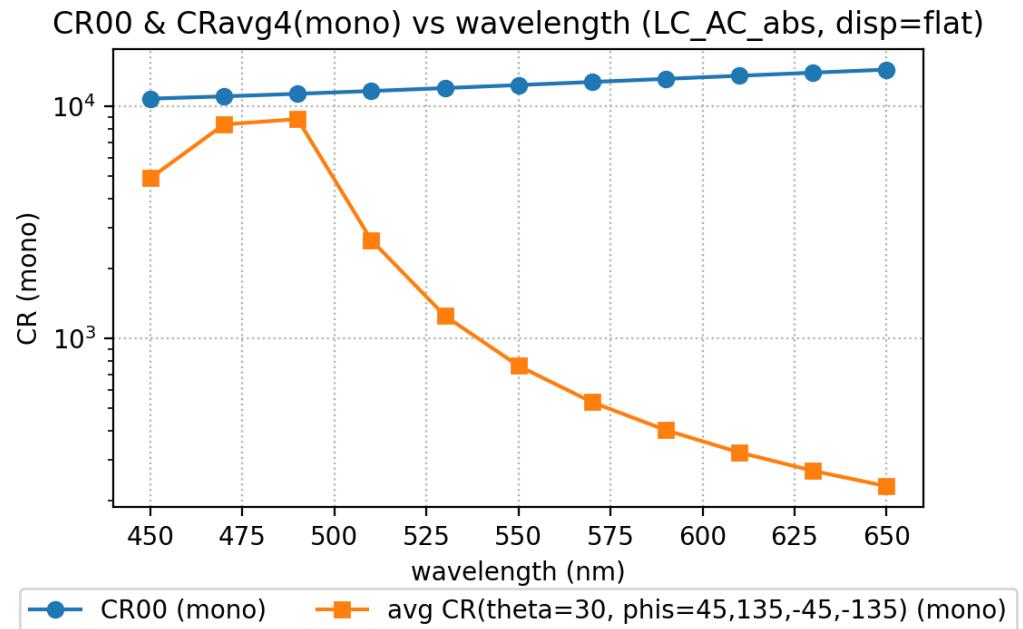


図 4: 単色評価 (mono) における $\text{CR00}(\lambda)$ と 4 方位平均 $\overline{\text{CR}}_{30}(\lambda)$ の波長依存性.

と長波長側で緩やかに増加するのに対し、斜め視点の平均性能は

$$\overline{\text{CR}}_{30}(490 \text{ nm}) \approx 8.8 \times 10^3$$

付近で最大となった後、長波長側で急激に低下し、

$$\overline{\text{CR}}_{30}(650 \text{ nm}) \approx 2.3 \times 10^2$$

まで落ちる。すなわち、正面暗状態を改善する方向（長波長側）と、斜め視点の平均性能を改善する

方向（短波長側）とが一致しない。

この差は、補償スタックが与える偏光状態の回転量（位相遅れ）が $\Gamma(\lambda) \propto 1/\lambda$ として波長により変化することに起因し、(i) 正面 ($\theta = 0^\circ$) では残留位相が小さくなるほど暗状態リークが減少しやすい一方、(ii) 斜め視点 ($\theta = 30^\circ$) では波長により「直交条件が回復する方位と程度」が強く変化するためである。特に表 3 の 450–510 nm では CR(30, +45) と CR(30, -45) の大小関係が大きく入れ替わり、一方の方位が高 CR に振れることで平均値が大きく変動している。

3.4 RGB/W の ISO 分布（図）

代表波長 B/G/R (450/546/610 nm) の単色 ISO と、白色 (W) ISO を図 5 に示す（図は別途作成するためコメントアウト）。ここで W は、B/G/R のリーク透過率 T_{leak} を平均して白色リークを作る定義であり、最適化で用いた W 評価と整合する。一方、B/G/R は単色 (mono) ISO であり、波長ごとの分布変化（ロープの回転・入れ替わり）を直観的に把握するために用いる。

図 5（挿入予定）では、B (450 nm) と G (546 nm), R (610 nm) で高 CR のロープ構造が異なり、特に短波長側で分布の変化が大きいことが分かる。これは表 3 に見られるように、 $\theta = 30^\circ$ の特定方位で CR が急激に増減し得ることと整合する。一方で W (白色) は B/G/R を平均化するため、単色の鋭いピークや方位入れ替わりは緩和され、広帯域で観測される見かけの視野角特性に近い分布となる。

3.5 実材料分散と分散補償スタックの必要性

本節の結果は flat 分散 ($\Delta n(\lambda)$ の分散を無視) に基づくため、実材料 (TAC, A-plate, C-plate, LC) の波長分散を考慮すると、

$$\Gamma(\lambda) \propto \frac{\Delta n(\lambda) d}{\lambda}$$

により波長依存性はさらに複雑化し得る。特に LC の複屈折分散やポリマー補償膜の分散は、単色最適化条件を白色へ拡張する際の主要因となる。したがって、広帯域で安定な視野角補償（CR の波長依存と方位非対称の抑制）を実現するには、実材料の分散を組み込んだモデルに基づき、

- A/C の材料分散を反映した $\text{ReA}(\lambda)$, $\text{ReC}(\lambda)$ の整合、
- 追加補償板（多層 A/C, あるいは分散補償用の複合膜）による波長依存性の相殺、
- 目的関数として白色 (W) だけでなく、単色 B/G/R の最悪値や方位非対称も含めた同時最適化

など、波長依存性を消す（または抑える）ような補償フィルムスタック設計が必要である。

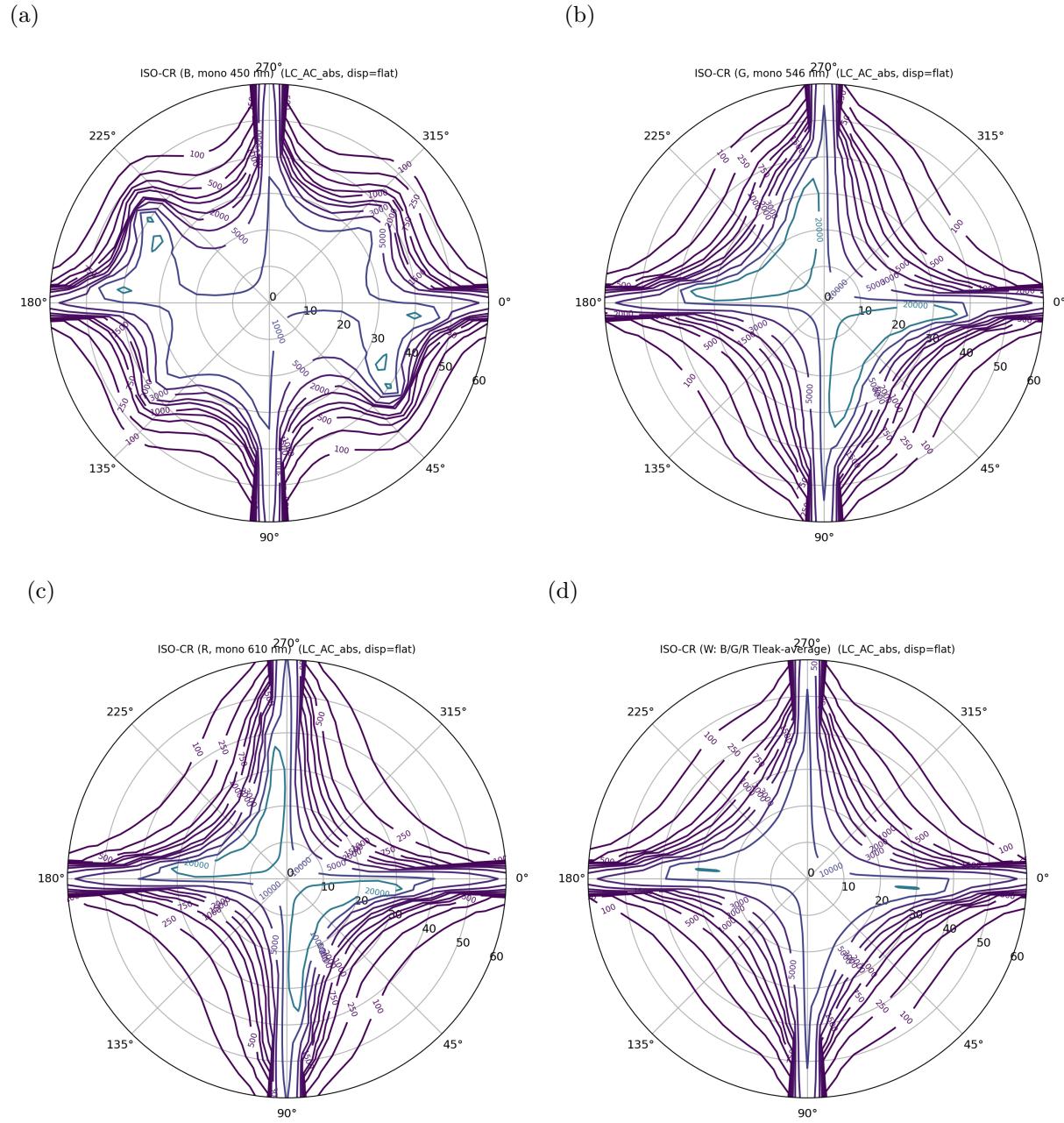


図 5: 代表波長 B/G/R の単色 ISO と、白色 (W) ISO の比較。単色では波長により ISO 分布（高 CR ロープの位置・強度）が大きく変化し得るのに対し、W は B/G/R のリーク平均によりスペクトル平均化された分布を与える。