

1 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（ $\text{ReA} = 116.25 \text{ nm}$, $\text{ReC} = 85 \text{ nm}$ ）を固定したまま、単色波長 λ を掃引し、(i) 正面暗状態 $\text{CR}_{00}(\lambda)$ と、(ii) 斜め視点 $\theta = 30^\circ$ における 4 方位平均

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

の波長依存性を評価する．ここで $\text{CR}_{00}(\lambda)$ は単色（mono）評価、 $\overline{\text{CR}}_{30}(\lambda)$ 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．

1.1 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．

1.2 数値結果（表）

表 1 に、波長ごとの $\text{CR}_{00}(\lambda)$ と 4 方位平均 $\overline{\text{CR}}_{30}(\lambda)$ 、ならびに内訳として $\text{CR}(30, \phi; \lambda)$ （ $\phi = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$ ）を示す．本表は `dispersion_summary_CRavg4.csv` 相当であり、以降の議論は本表に基づく．

表 1: 波長掃引における単色評価（mono）のまとめ（`dispersion_summary_CRavg4.csv` 相当）． $\text{CR}_{00}(\lambda)$ 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．

$\lambda \text{ [nm]}$	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

1.3 波長依存プロット (図)

図1は $CR_{00}(\lambda)$ と $\overline{CR}_{30}(\lambda)$ の波長依存性を示す(plot_lambda_vs_CR00_and_CRavg4_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.

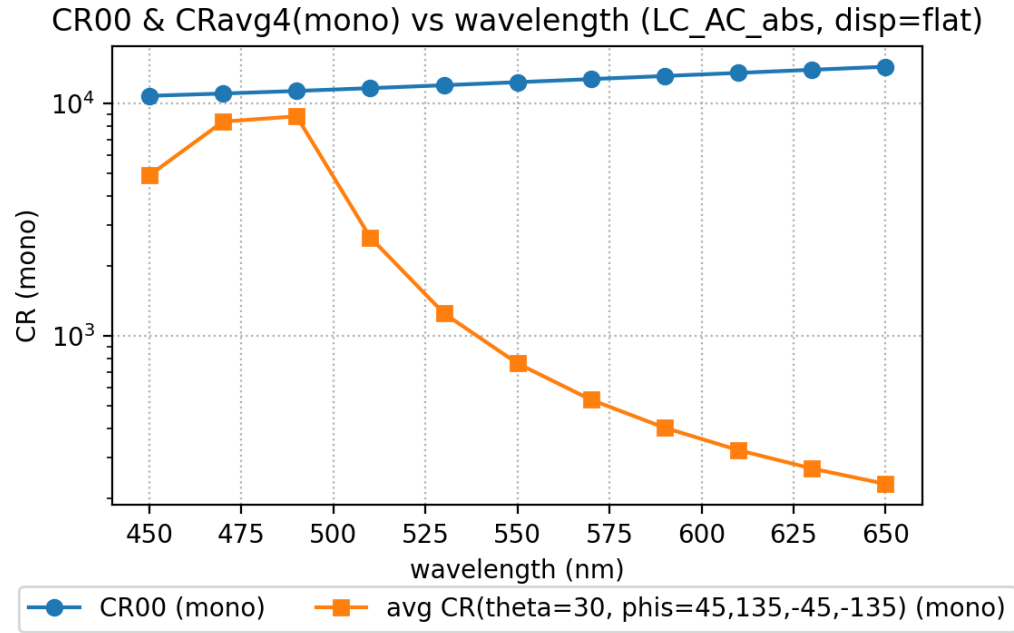


図1: 単色評価 (mono) における $CR_{00}(\lambda)$ と4方位平均 $\overline{CR}_{30}(\lambda)$ の波長依存性.

図1 (および表1) から, $CR_{00}(\lambda)$ 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

$$CR_{00}(450 \text{ nm}) \approx 1.08 \times 10^4 \rightarrow CR_{00}(650 \text{ nm}) \approx 1.44 \times 10^4$$

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

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

付近で最大となった後, 長波長側で急激に低下し,

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

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 ($\theta = 0$) 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1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.

1.4 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 2 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 (ローブの回転・入れ替わり) を直観的に把握するために用いる.

図 2 (挿入予定) では、B (450 nm) と G (546 nm), R (610 nm) で高 CR のローブ構造が異なり、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 1 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.

1.5 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、

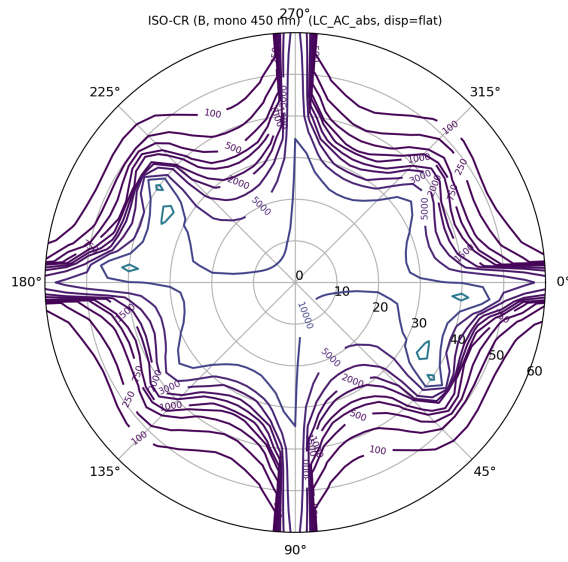
$$\Gamma(\lambda) \propto \frac{\Delta n(\lambda) d}{\lambda}$$

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、

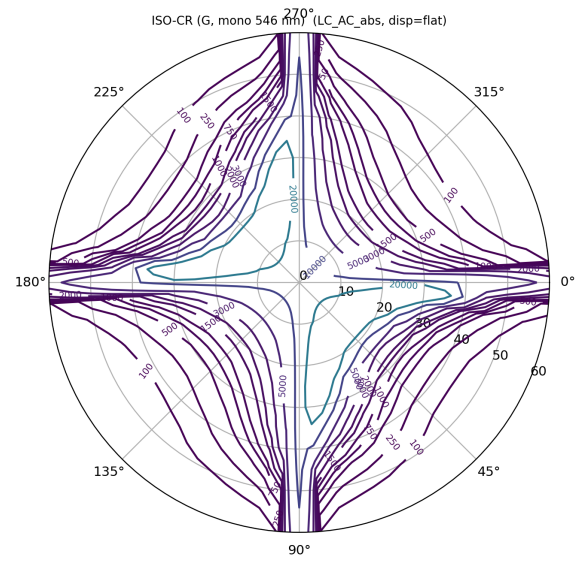
- A/C の材料分散を反映した $\text{ReA}(\lambda)$, $\text{ReC}(\lambda)$ の整合,
- 追加補償板 (多層 A/C, あるいは分散補償用の複合膜) による波長依存性の相殺,
- 目的関数として白色 (W) だけでなく、単色 B/G/R の最悪値や方位非対称も含めた同時最適化

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.

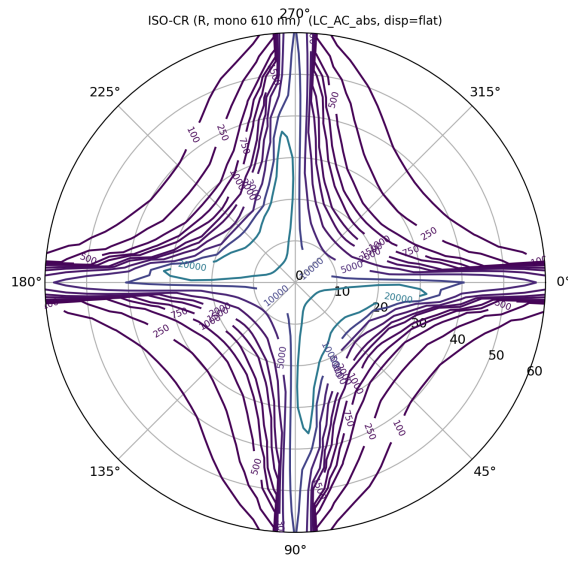
(a)



(b)



(c)



(d)

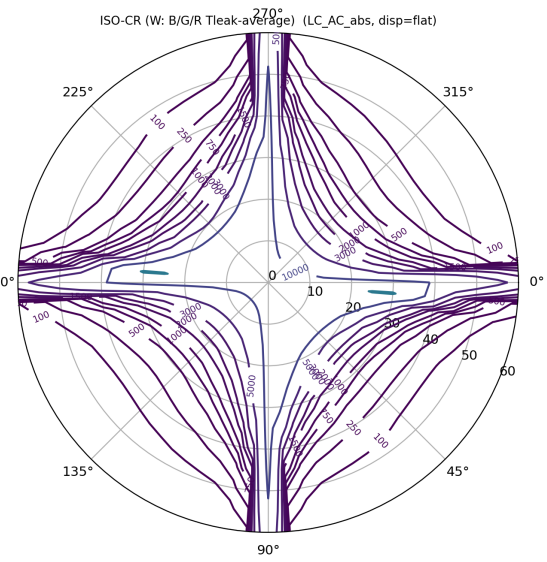


図 2: 代表波長 B/G/R の単色 ISO と、白色 (W) ISO の比較. 単色では波長により ISO 分布 (高 CR ロープの位置・強度) が大きく変化し得るのに対し, W は B/G/R のリーク平均によりスペクトル平均化された分布を与える.