

スマートフォンを用いたアップリンク可視光通信の スクリーン低輝度化手法の比較

川出 有紗, 中條 渉, 小林 健太郎

名城大学 大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻

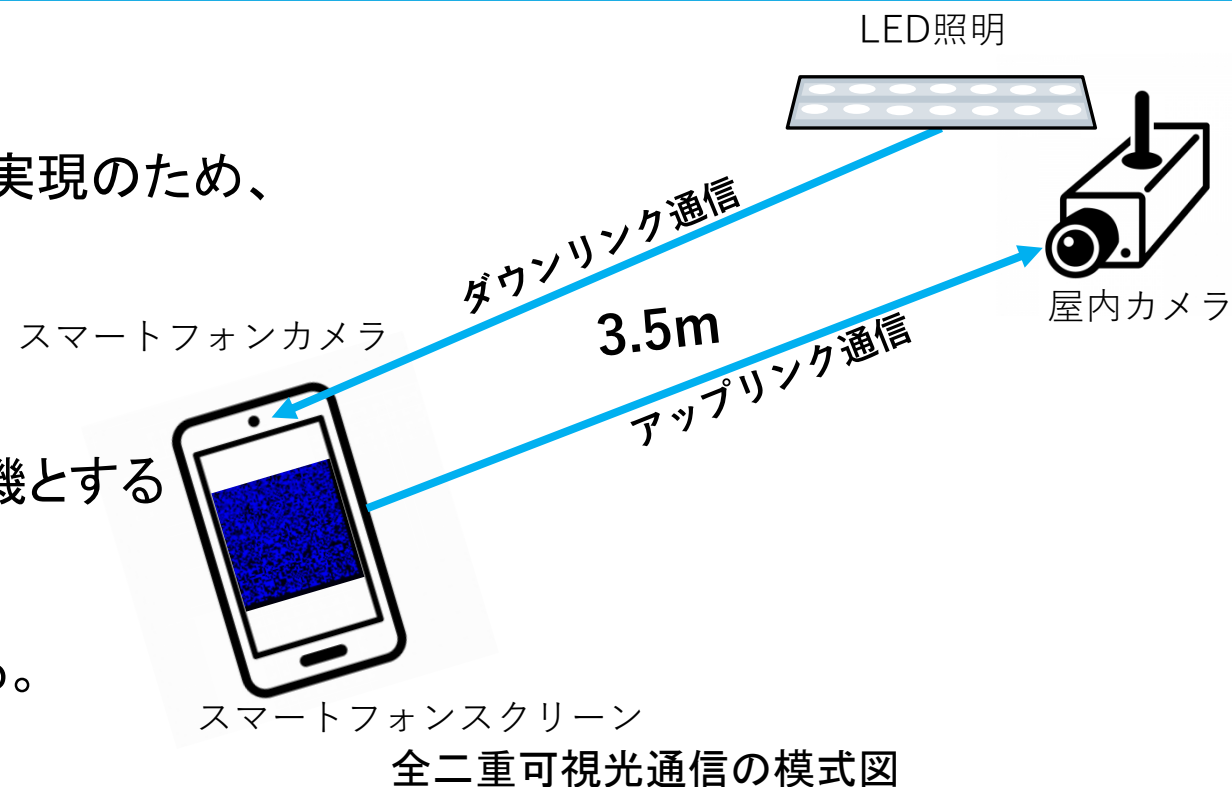
目次

1. 研究背景・目的
2. 点光源による受信ピクセル値分布の数値モデル
3. 点広がり関数による受信ピクセル値分布の数値モデル
4. 縮小白セルを用いた実験
5. 縮小青セルを用いた実験
6. 結論

1. 研究背景

利用者による送受信双方が可能な全二重可視光通信の実現のため、既に広く研究されているダウンリンク可視光通信に加え、**アップリンク可視光通信**が必要となる。

本研究のアップリンク可視光通信では遠距離3.5m間でスマートフォン画面を送信機、屋内望遠カメラを受信機とするスクリーンカメラ通信(SCC)を行う。
SCCでは送信データ画像をスクリーン上に表示し、受信者は撮影画像の受信ピクセル値から情報を復号する。



遠距離アップリンクSCCの特徴: データレートの向上とセキュリティ確保の観点から低輝度空間分割多重 (SDM)スクリーンを用いてセル数を増やすのに加え、盗聴者が受信ピクセル値を得られない手法を提案し実証している。

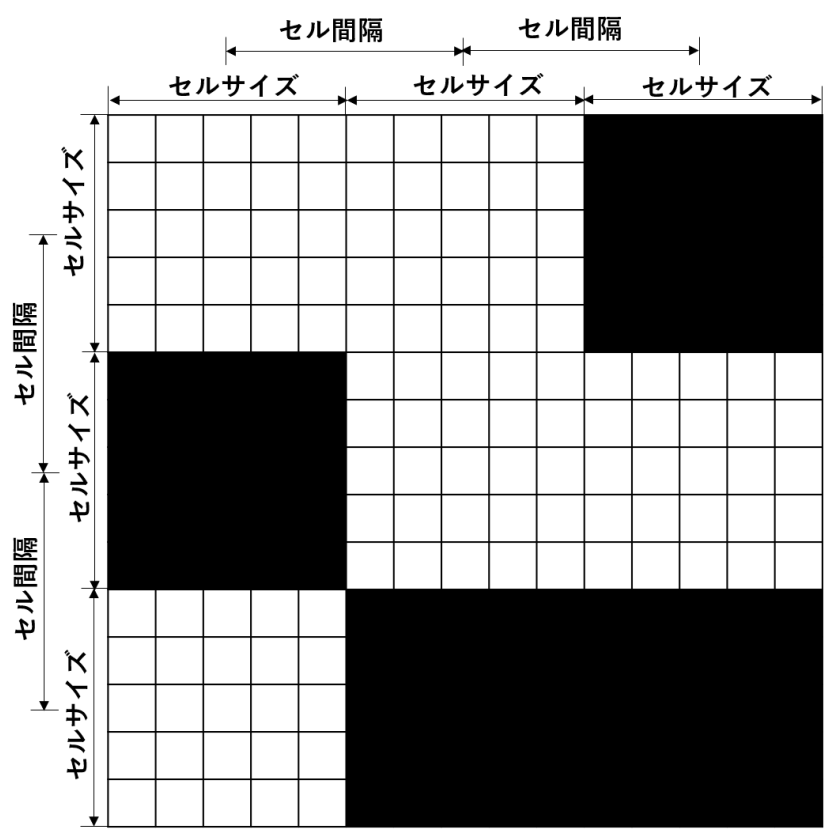
低輝度化の課題: 送信ピクセル値を低下させると、受信画像内の周囲光や送信機の調光方法などによる雑音が発生し、シンボル判定に影響が出る可能性がある。

解決策: この影響を除くため、スクリーン輝度を下げずに低輝度通信を実現する必要がある。
これまでに高輝度セルのセルサイズを縮小することでスクリーン輝度を保ったままでの低輝度化を提案している。

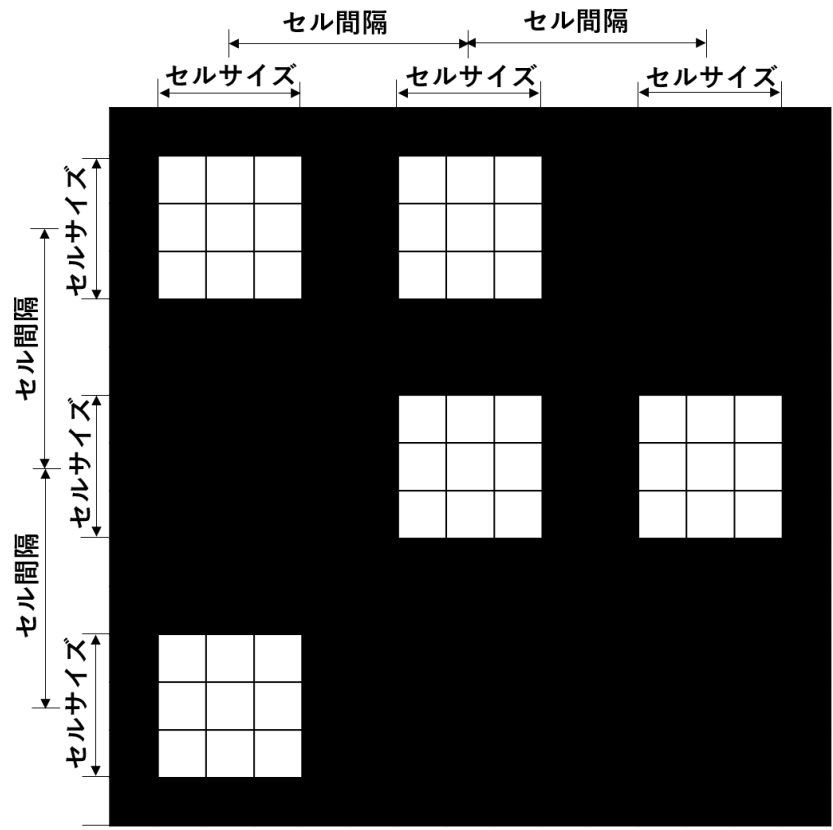
セルサイズ縮小による低輝度化の原理

セルサイズ縮小では隣接するセル同士の間隔を保ったまま1セルあたりのピクセル数を減少させる。低輝度化のパラメータとなる縮小率 α は以下の式で表され、縮小率が小さいほど低輝度化される。

$$\alpha = \frac{\text{縮小後の1セルのピクセル数}}{\text{縮小前の1セルのピクセル数}}$$



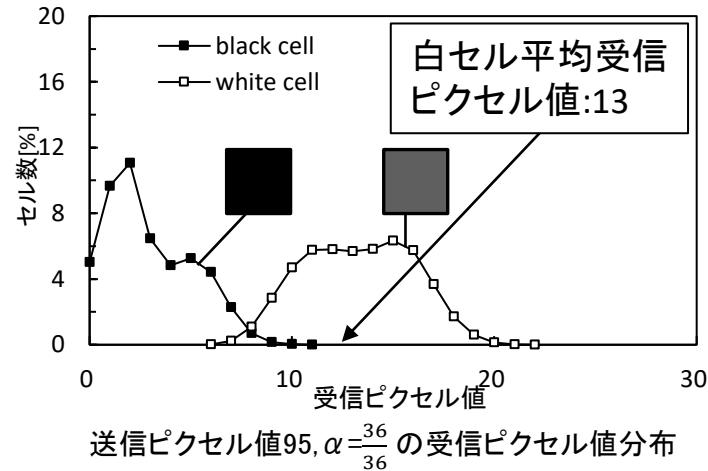
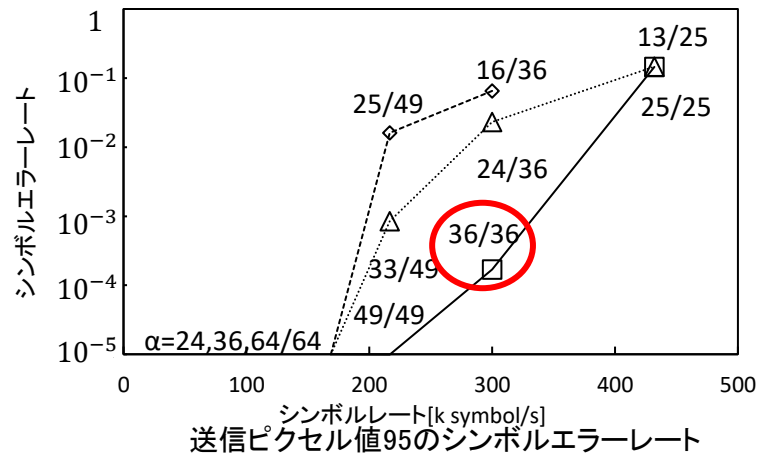
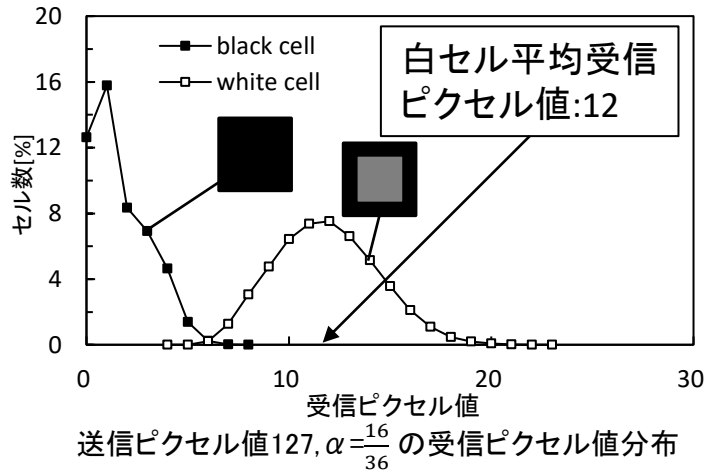
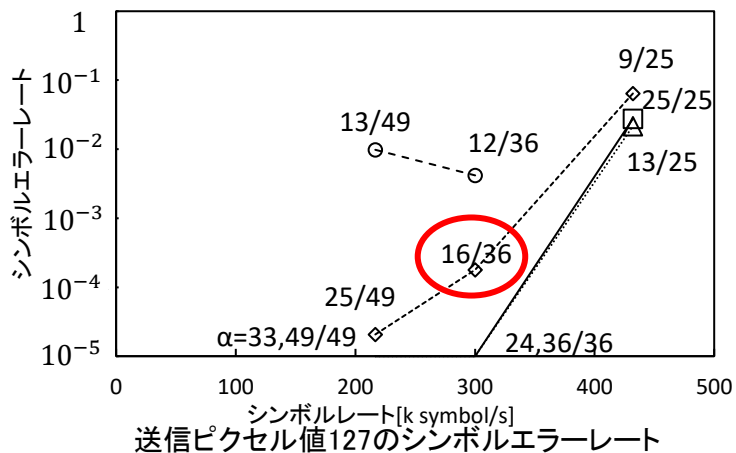
従来のセル (縮小率 $\alpha=1$)



セルサイズ縮小セル(縮小率 $\alpha=\frac{9}{25}$)

セルサイズ縮小による低輝度化の現状

送信ピクセル値127の白色セルを縮小することで低ピクセル値95と同等の通信品質と低輝度を実現している。



これまでの報告では最大送信ピクセル値255の高輝度縮小セルを用いた雑音に強い低輝度化を実現していない。また、高輝度縮小セルと低輝度セルの通信性能の違いが明確に示されていない。

研究目的

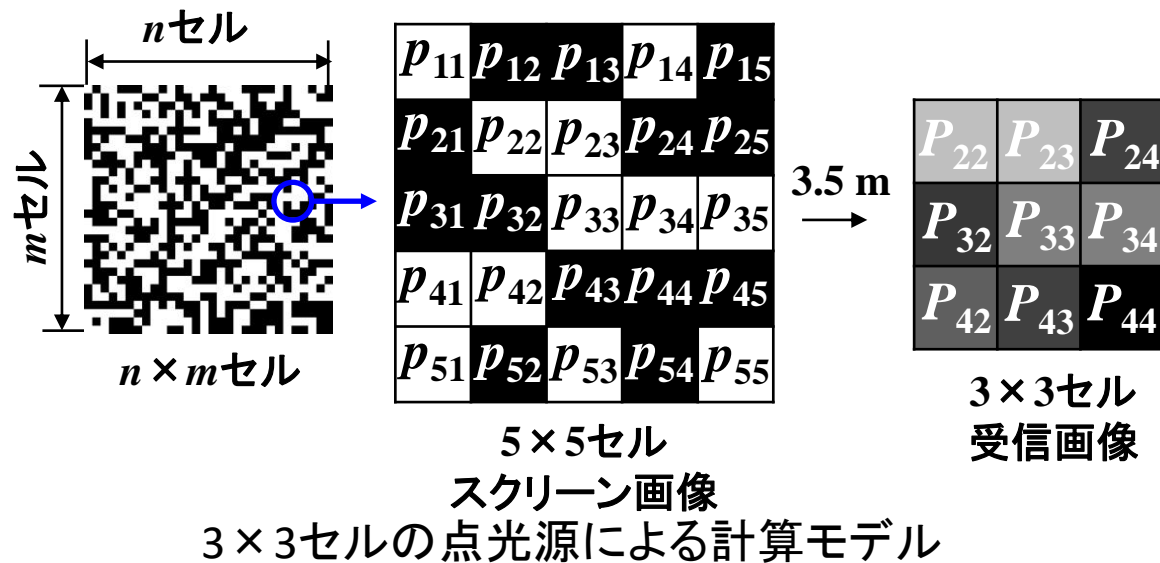
高輝度255縮小セルを用いて雑音の影響を受けにくい低輝度化を実現し、低輝度セルと通信性能を比較して違いを明らかにする。

上記のため、以下のシミュレーションと実験を行った。

- 点光源モデルによる受信ピクセル値分布のシミュレーション
数値モデルによって周囲のセルによる受信ピクセル値への影響を計算する。
- 点広がり関数モデルによる受信ピクセル値分布のシミュレーション
点光源数値モデルは縮小セルに適用できないため、
複数ピクセルを考慮した数値モデルによってセルサイズ縮小による低輝度化が可能なことを示す。
- 縮小セルを用いた通信実験
通信実験とスクリーン輝度値の測定によって高輝度縮小セルによる低輝度化を実証する。
高輝度縮小セルと低輝度セルの違いを受信ピクセル値と広角特性から明らかにする。

2. 点光源による受信ピクセル値の計算モデル

点光源モデルでは、送信画像の1セルを1点の光源として受信ピクセル値を計算する。



遠距離からの撮影では焦点ボケによって受信画像に空間シンボル間干渉(ISI)が生じる。空間ISIによって各セルは周囲のセルに影響される。

$$P_{ij} = \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} w_{ijkl} p_{kl} \quad (1)$$

3×3 セル受信画像の受信ピクセル値 P_{ij} は空間ISIを考慮し、 5×5 セル送信画像の送信ピクセル値 p_{kl} によって式(1)で表される。

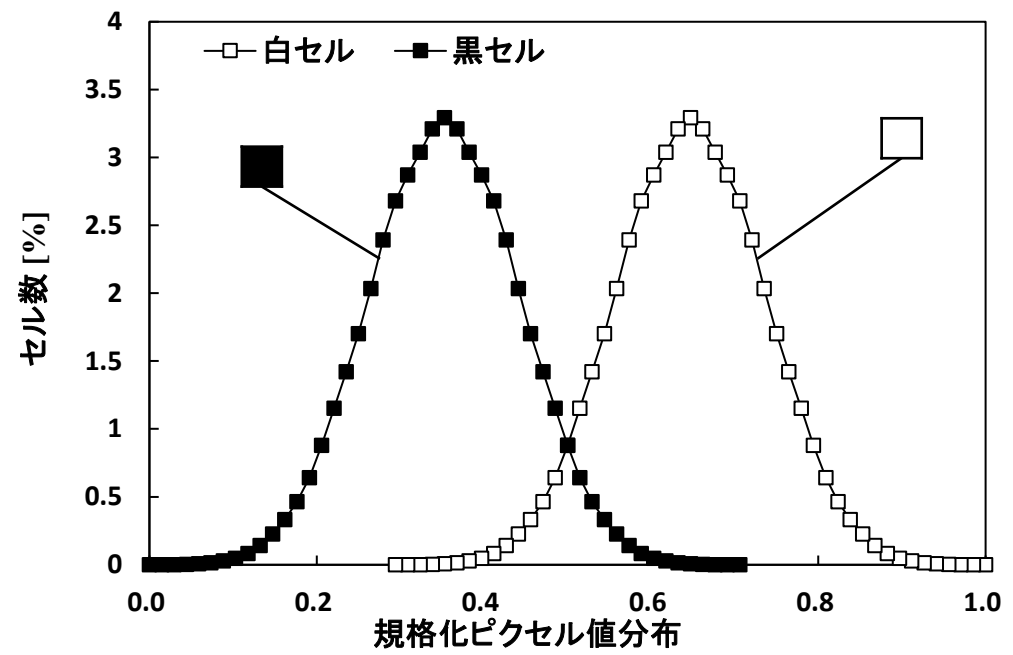
w_{ijkl} :送信スクリーンの各ピクセル値 $p_{11 \sim 55}$ と受信カメラ画像のピクセル値 P_{ij} の間の結合量($0 \leq w_{ijkl} \leq 1$)
空間ISIが増大するほど w_{ijkl} の値は大きくなる。

点光源による受信ピクセル値分布(計算値)

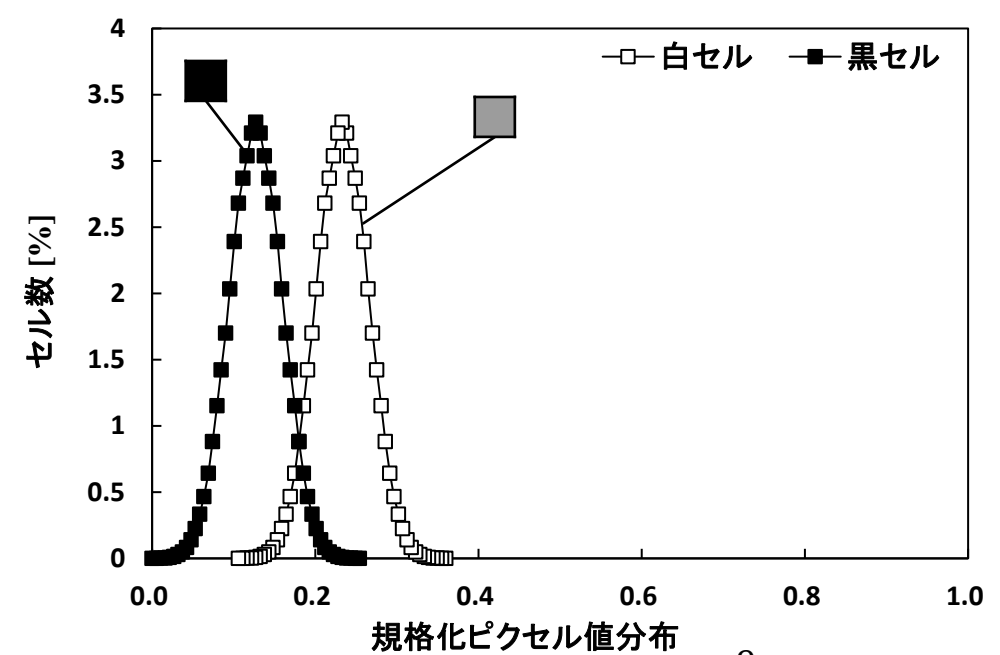
式(2)で表す5×5中央セルの受信ピクセル値 P_{33} の計算値を示す。

$$P_{33} = \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^5 w_{33kl} p_{kl} \quad (2)$$

結合係数 w は $w_{3333} = 1$, $w_{33kl} = 0.2$ ($2 \leq k, l \leq 4, k, l \neq 3,3$), $w_{33kl} = 0.05$ ($1 \leq k, l \leq 5, \notin (2 \leq k, l \leq 4)$) とする。



(a)高輝度セル ($p_{kl} = 1$)



(b)低輝度セル ($p_{kl} = \frac{9}{25}$)

中心セルの受信ピクセル値分布 P_{33}

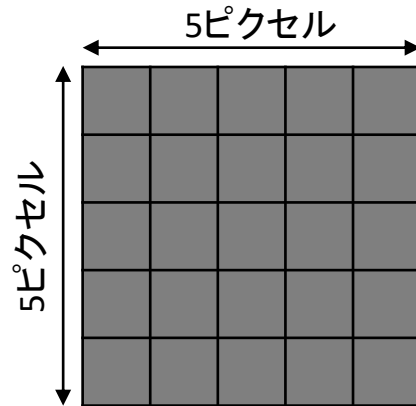
受信セルは周囲セルからの空間ISIを受けるため、受信ピクセル値分布が広がる。

式(1)では1セルを1点の光源として中央セルが受ける空間ISIを考慮し、受信ピクセル値を計算している。しかし、高輝度縮小セルの受信ピクセル値を点光源モデルを用いて計算するとその結果は低輝度セルと全く同値となるため、分布の差を明らかにできない。

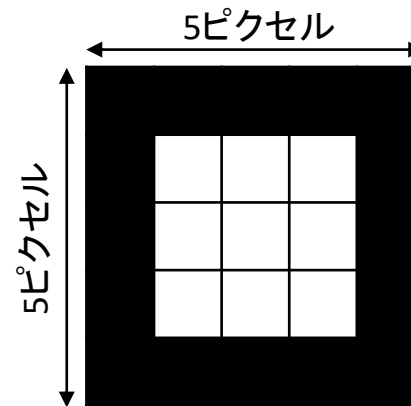
3. 点広がり関数(PSF)による受信ピクセル値分布の計算モデル

点広がり関数(PSF)を用いて1セルが複数のピクセルからなることを考慮し、受信ピクセル値分布を計算することで縮小セルによる低輝度化が可能なことを示す。

複数ピクセルからなる光源の受信ピクセル値を計算するには、送信ピクセル毎に点広がり関数(PSF)を用いる。PSFではピクセル1つ1つが他のピクセルから影響を受けていることを考慮して受信ピクセル値を計算する。



(a) 低輝度セル (規格化送信ピクセル値 $\frac{9}{25}$, $\alpha=1$)



(b) 高輝度縮小セル (規格化送信ピクセル値 1, $\alpha=\frac{9}{25}$)

PSFモデルによる送信セル

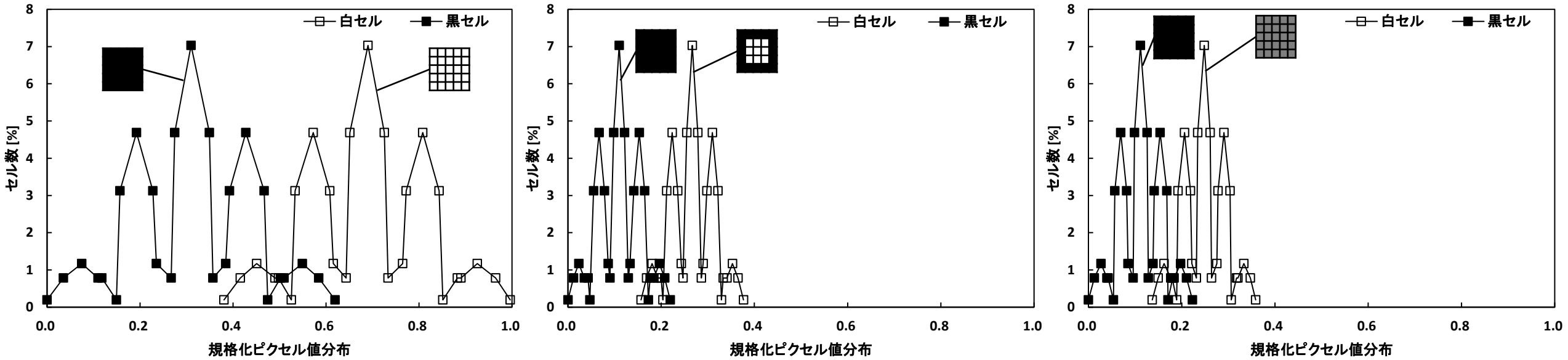
送信ピクセル毎のPSFは式(3)に示す二次元ガウス形関数によって近似できる。

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3) \quad \begin{array}{l} x, y: \text{スクリーン上の各ピクセルの座標} \\ \sigma: \text{標準偏差} \end{array}$$

PSFにより、従来セルと縮小セルを区別して受信ピクセル値分布を計算することができる。

点広がりに関数(PSF)による受信ピクセル値分布(計算値)

式(3)で複数ピクセルの広がりを考慮した受信ピクセル値の計算値を縮小率 α と規格化送信ピクセル値ごとに示す。



(a) 高輝度セル ($\alpha=1$, 送信ピクセル値 1)

(b) 高輝度縮小セル ($\alpha=\frac{9}{25}$, 送信ピクセル値 1)

(c) 低輝度セル ($\alpha=1$, 送信ピクセル値 $\frac{9}{25}$)

PSFによるピクセル値分布の比較($\sigma=3$)

高輝度セルを縮小した場合の分布では低輝度セルと同様に低い受信ピクセル値が得られており、送信ピクセル値を低輝度化した場合と同様になっている。

また若干の違いが見られ、わずかに縮小セルの方が空間ISIが小さくなっている。

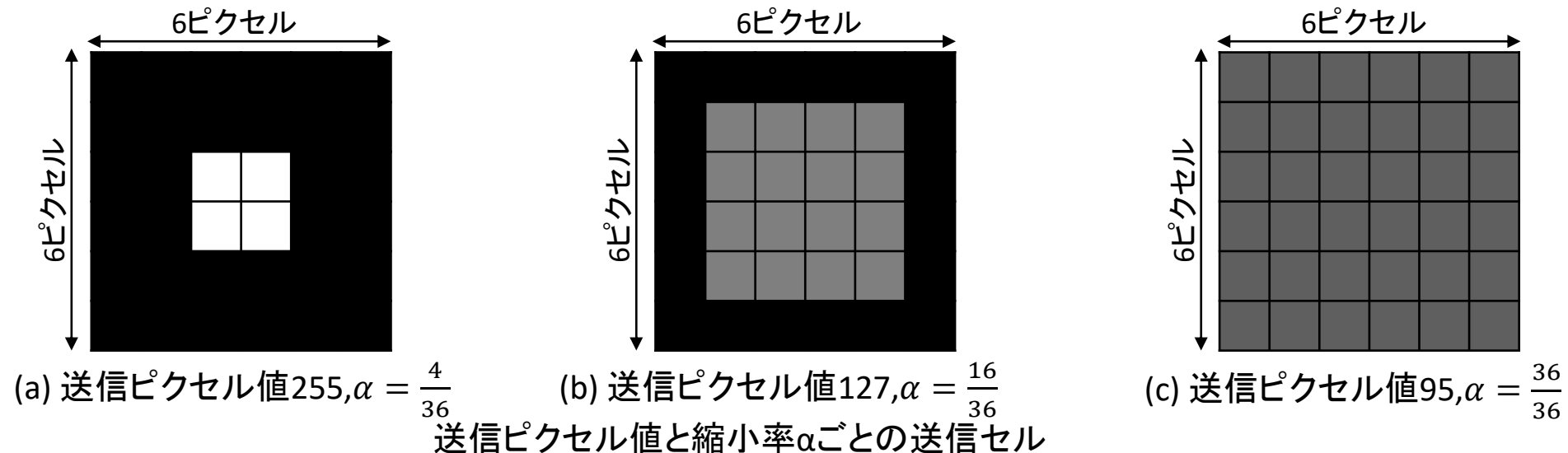
このことからセルサイズ縮小によって低輝度セルと同等に受信ピクセル値を下げられることが示された。

4. 実験条件(縮小白色セル)

数値モデルによって高輝度縮小セルによる低輝度化が可能なことが示された。よって、高輝度縮小白色セルによる低輝度化を実証するため、通信実験を行う。各送信ピクセル値255,127,95において縮小率 α をパラメータとし、シンボルエラーレート(SER)と受信ピクセル値分布を調べる。

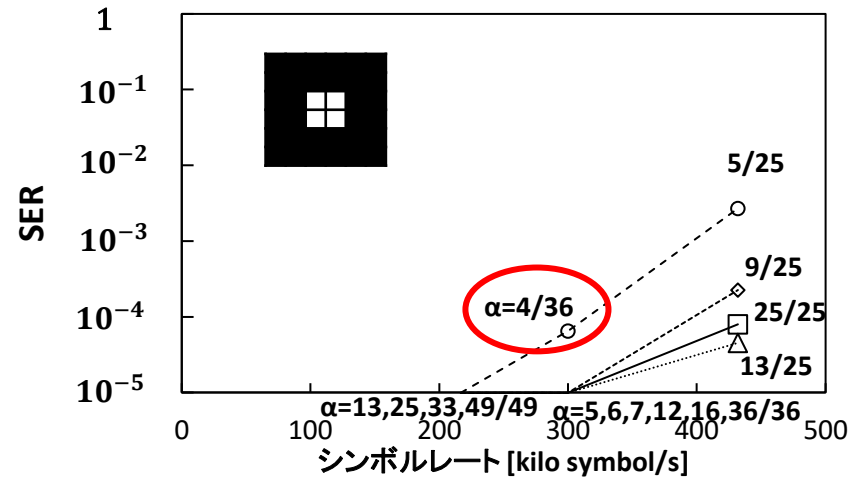
通信実験では最も低い送信ピクセル値95で得られたSERと同等の通信品質を送信ピクセル値255,127の縮小セルによって得られるか確認する。

また高輝度縮小セルと低輝度セルのスクリーン輝度値を測定し、比較を行う。

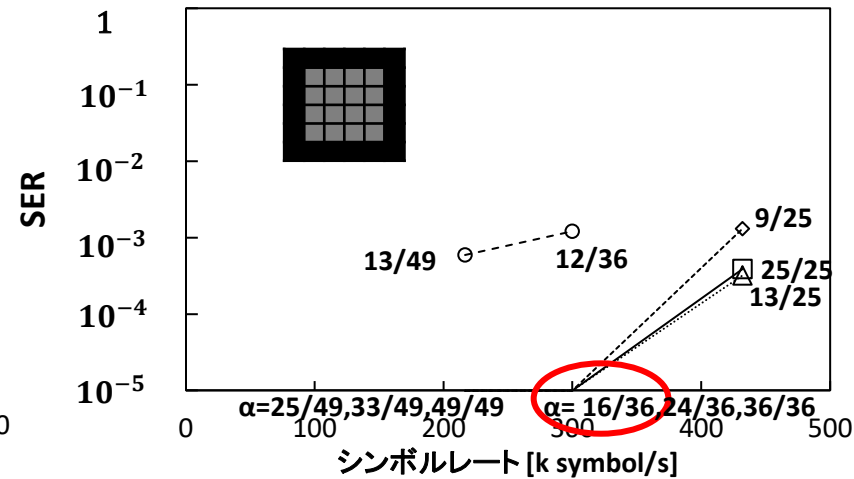


縮小白色セルのシンボルエラーレート(SER)

通信実験で得た送信ピクセル値255,127,95におけるSERを示す。

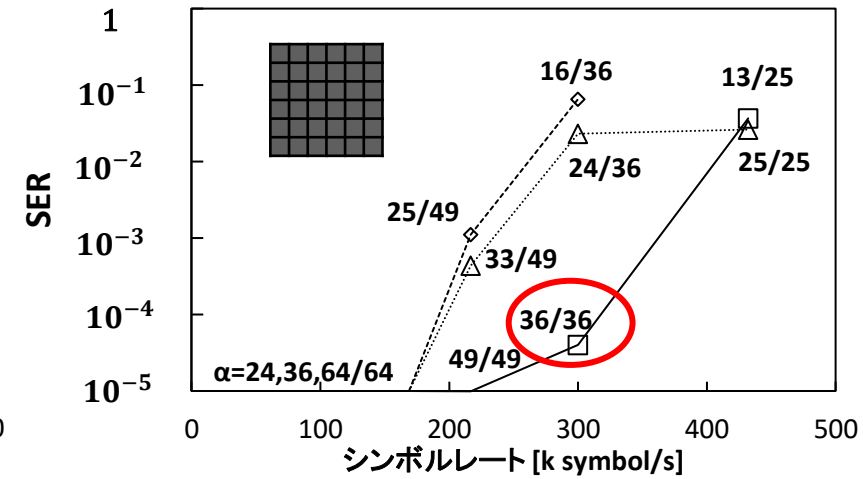


(a)送信ピクセル値255



(b)送信ピクセル値127

シンボルレートに対するSER



(c)送信ピクセル値95

送信ピクセル値95の場合、従来セルの縮小率 $\alpha = \frac{36}{36}$ ではシンボルレート300k symbol/sでSER= 4×10^{-5} が得られる。

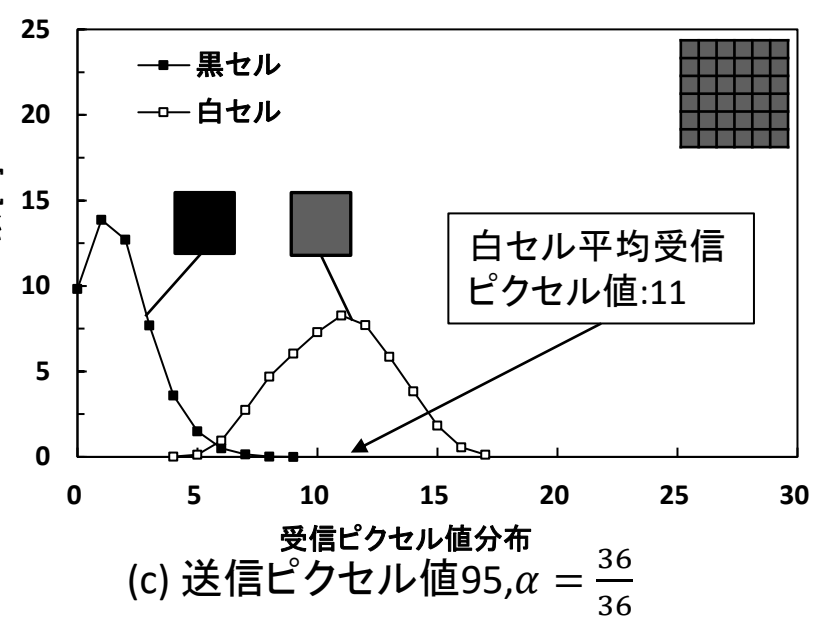
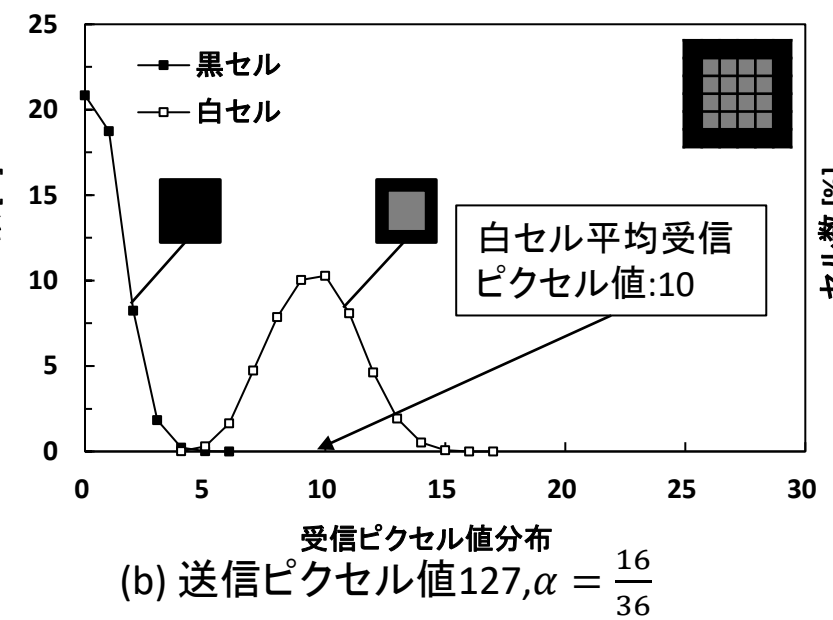
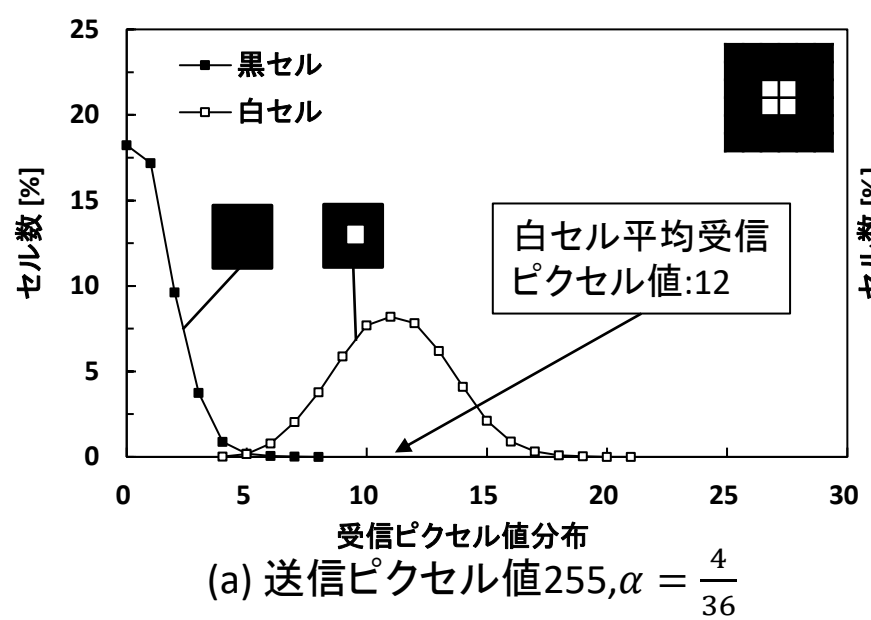
送信ピクセル値127の場合、 $\alpha = \frac{16}{36}$ でシンボルレート300k symbol/sでSER $< 1 \times 10^{-5}$ を、

送信ピクセル値255, $\alpha = \frac{4}{36}$ で同様のシンボルレートにおいてSER= 6×10^{-5} が得られた。

それぞれの送信ピクセル値において $\alpha = \frac{4}{36}, \frac{16}{36}, \frac{36}{36}$ の場合に同等のSERを得た。
これらの縮小率について受信ピクセル値の比較を行う。

セルサイズ縮小白セルの受信ピクセル値分布(実験値)

同等のSERを得られた3通りの条件について受信ピクセル値分布を示す。



各送信ピクセル値,縮小率の受信ピクセル値分布

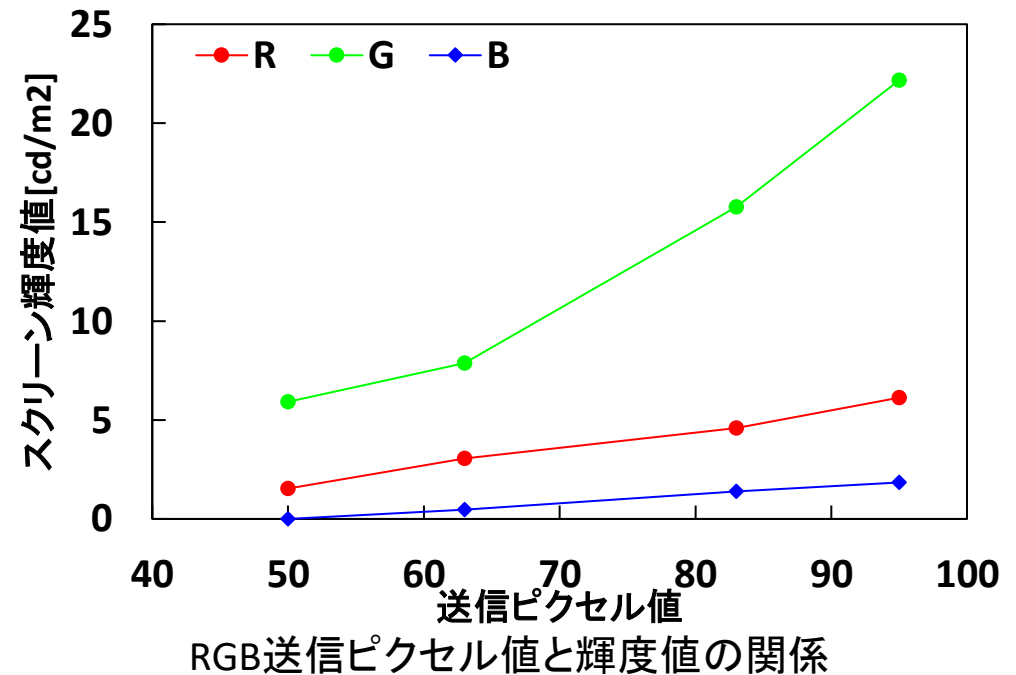
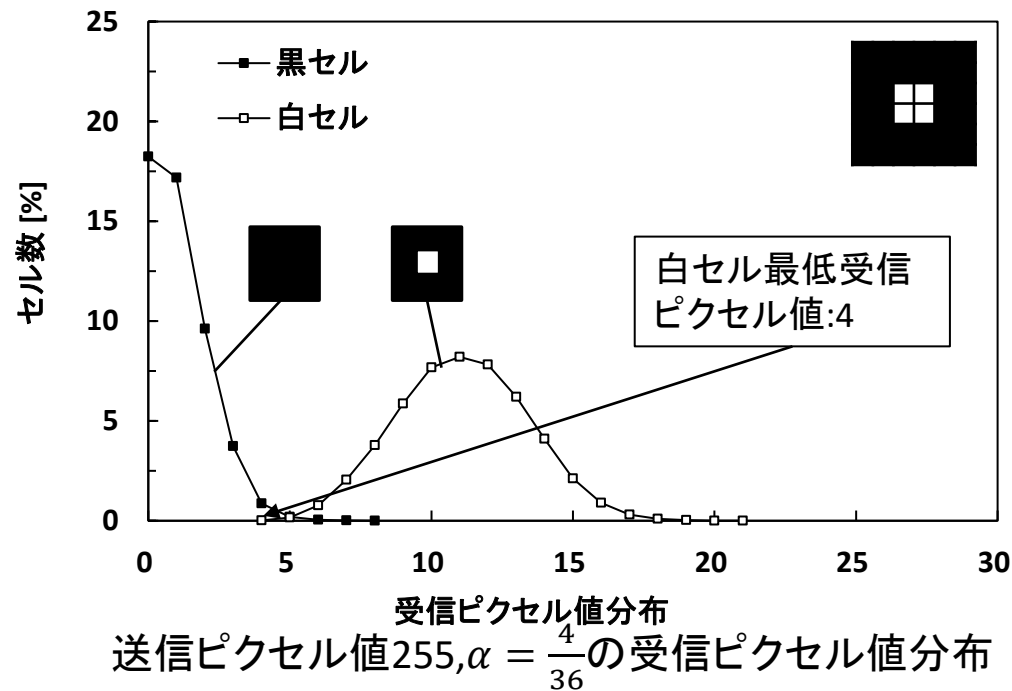
送信ピクセル値255,127,95においてそれぞれ $\alpha = \frac{4}{36}, \frac{16}{36}, \frac{36}{36}$ の全てについて同等の受信ピクセル値を得た。
スクリーン輝度値を測定した結果、それぞれ23, 20, 23 cd/m²となり同等のスクリーン輝度値を得た。

高輝度縮小白色セルを用いて新たに最大送信ピクセル値255での低輝度化を実現した。

5. 実験の目的(縮小青色セル)

高輝度縮小白色セルでの低輝度化を実現したが、白色セルの最低受信ピクセル値は4となっており、これ以上の低輝度化には受信機の感度が不足している。

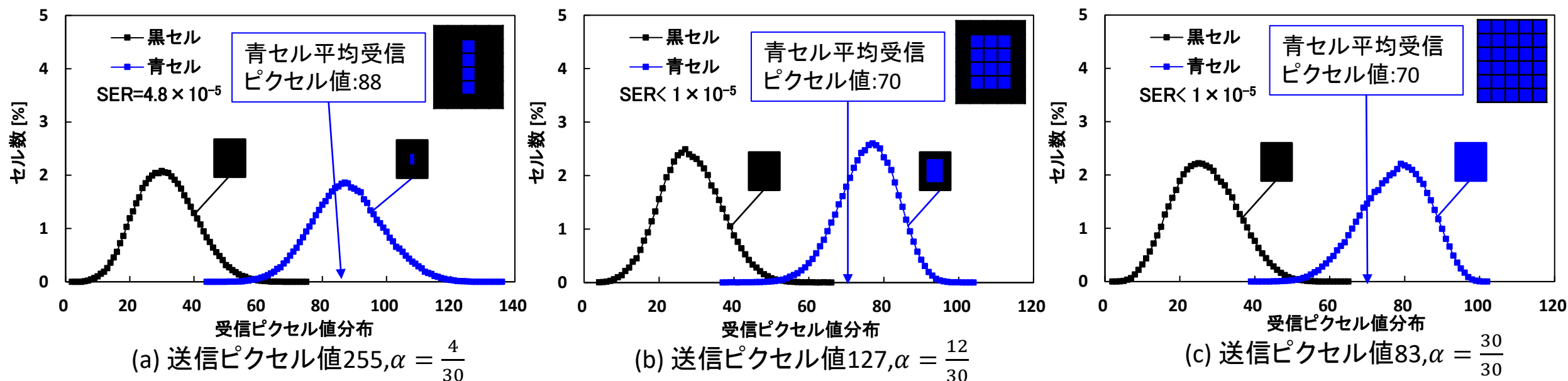
高輝度縮小セルと低輝度セルの特性の違いを明らかにするため、更なる低輝度化を実現する。よって、より低輝度な青色セル画像とより高感度、高解像度なフルHDビデオカメラ受信機を用いて通信実験を行う。



セルサイズ縮小青セルの受信ピクセル値分布(実験値)

シンボルレート 360k symbols/sとなる 120×200 セル,(1セルにつき 5×6 ピクセル)を用いてSERを測定した。

青色セルでの通信実験では $\alpha = \frac{4}{30}, \frac{12}{30}, \frac{30}{30}$ において同等のSERが得られたため、受信ピクセル値分布を示す。

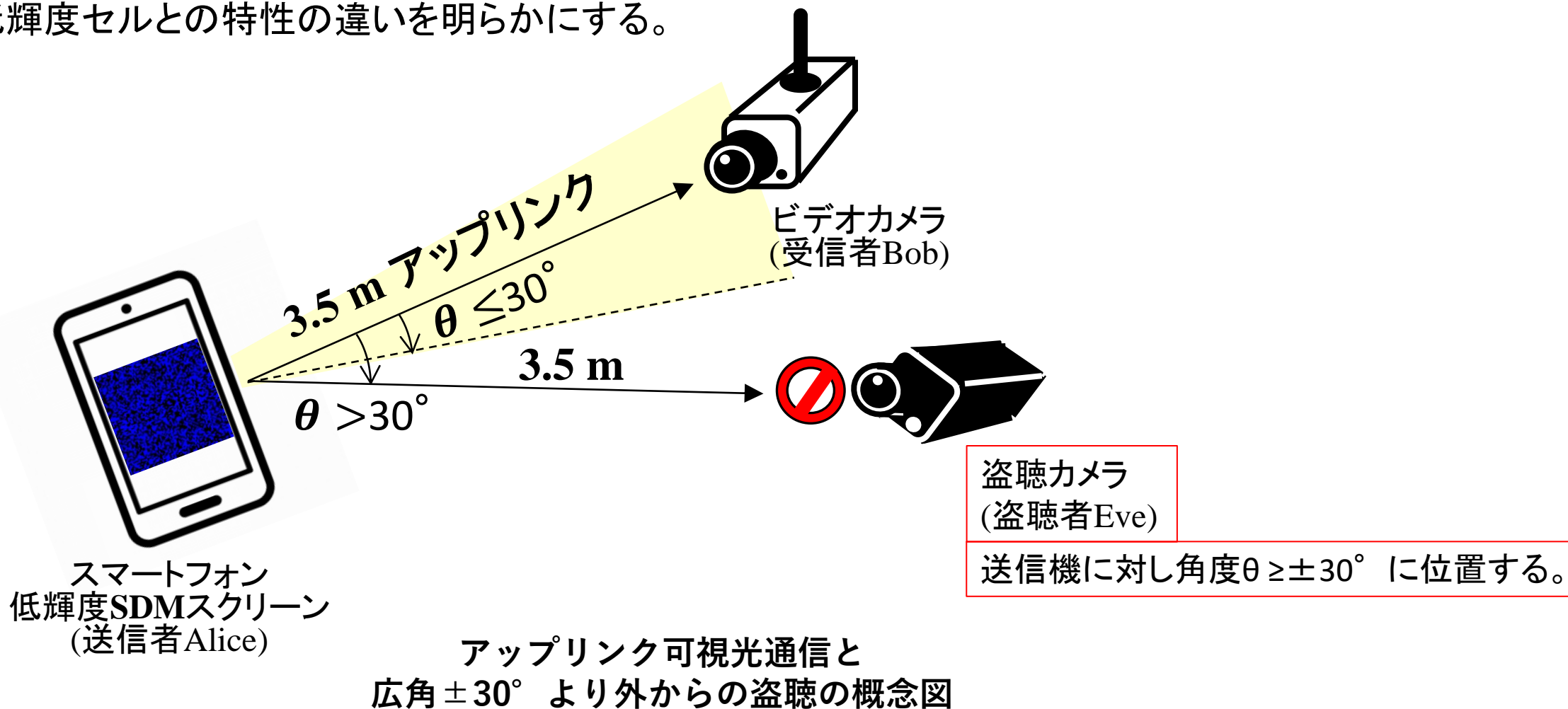


各送信ピクセル値,縮小率の受信ピクセル値分布

実際のスクリーン輝度値は送信ピクセル値255,127,83においてそれぞれ1.4, 1.6, 1.6 cd/m^2 となり全ての条件についてほぼ同等の低輝度を得た。低輝度化において送信ピクセル値255の高輝度縮小セルが有効なことが青セルでも確認できた。

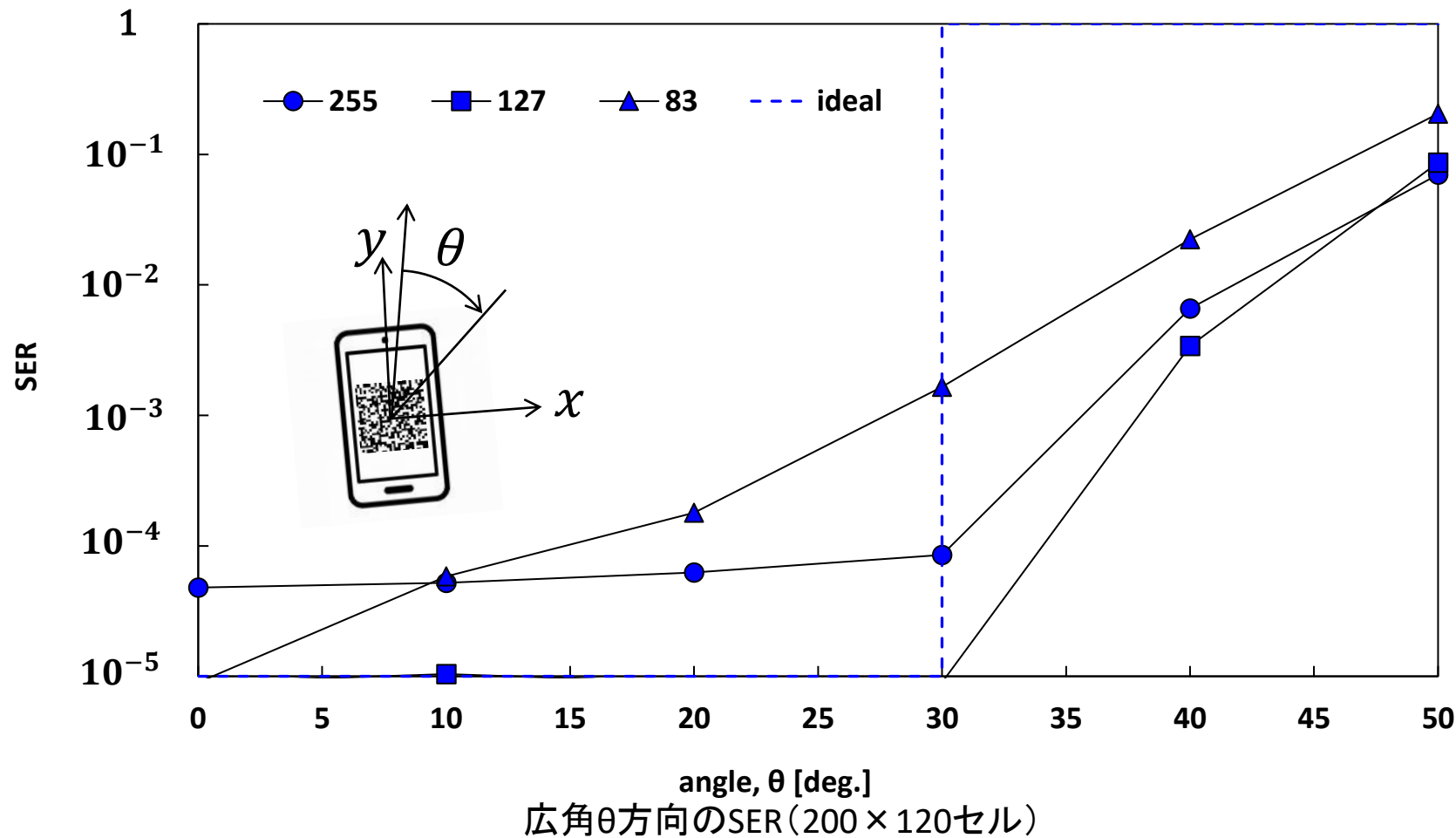
セルサイズ縮小青色セルの広角特性評価

スクリーン正面からの通信実験では高輝度縮小セルと低輝度セルの明確な違いを得られなかった。よって広角特性の面から評価を行い、違いを明らかにする。以下に示す $\theta > 30^\circ$ の広角からの盗聴を想定し、高輝度縮小青色セルの広角特性を評価する。また、低輝度セルとの特性の違いを明らかにする。



セルサイズ縮小青色セルの広角でのSER

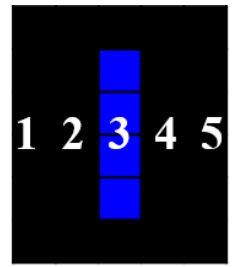
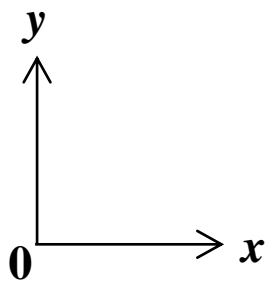
広角からの盗聴を防ぐため、 $\theta \leq 30^\circ$ でのSERは低く、 $\theta > 30^\circ$ では高いSERとなる特性が理想的と仮定する。



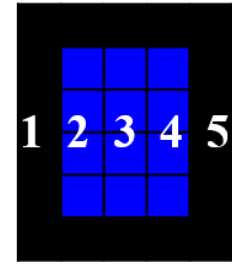
送信ピクセル値255,127では、 $\theta \leq 30^\circ$ でのSERは一定である。しかし83では $\theta \leq 30^\circ$ でもSERが増加し続けている。よって広角での物理層セキュリティと通信品質の両立には高輝度縮小セルの方が適していると考えられる。

ピクセル位置ごとの平均受信ピクセル値分布

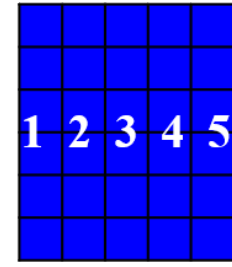
縮小セルのSERが $\theta \leq 30^\circ$ では一定となる理由を明らかにするため、ピクセル位置ごとの平均受信ピクセル値分布を測定した。



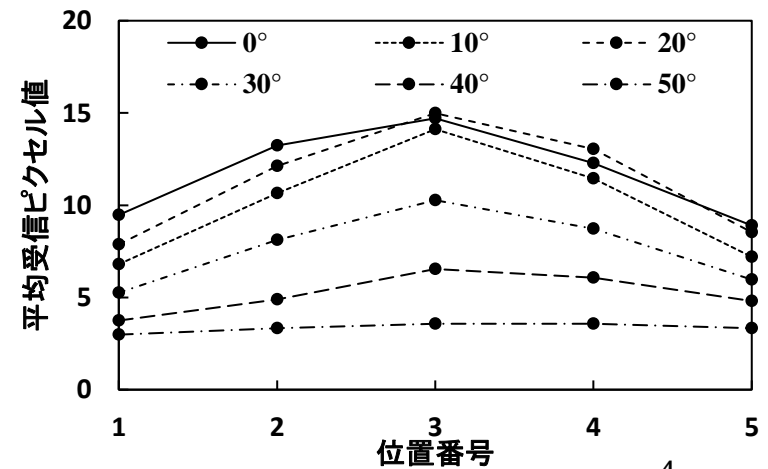
(a) $\alpha = \frac{4}{30}$



(b) $\alpha = \frac{12}{30}$

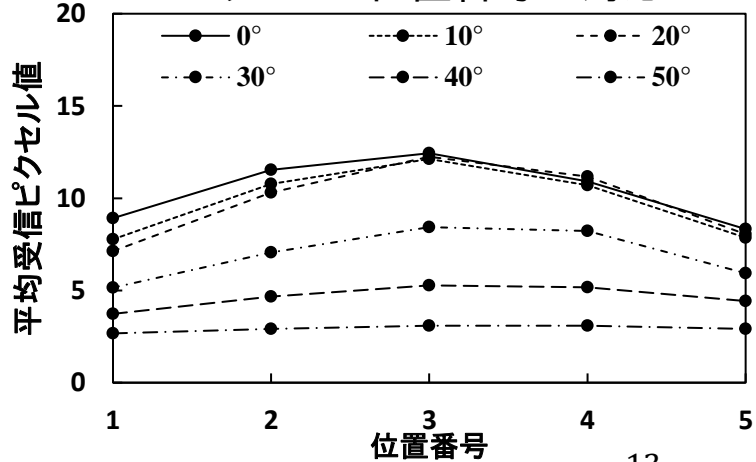


(c) $\alpha = \frac{30}{30}$

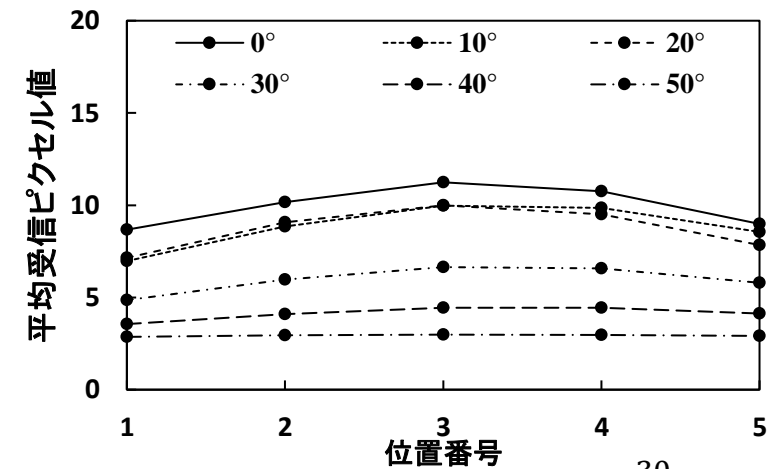


(a) 送信ピクセル値255, $\alpha = \frac{4}{30}$

ピクセルと位置番号の対応



(b) 送信ピクセル値127, $\alpha = \frac{12}{30}$



(c) 送信ピクセル値83, $\alpha = \frac{30}{30}$

ピクセル位置ごとの受信ピクセル値分布

高輝度縮小セルではピクセル値分布の中央値がより高く、周囲光や送信機の調光方法による雑音の影響を受けづらくなるためSERを一定に保つことができると考えられる。

結論

高輝度縮小セルによる低輝度化の検討,実験を行い、以下のことが明らかになった。

- 点広がり関数をガウス形関数として近似したシミュレーションによって高輝度縮小セルによって低輝度セルと同様の低輝度化が有効なことを示した。
- 通信実験において高輝度セルの縮小により白色セル,青色セルともに最大送信ピクセル値255を用いて低輝度95と同等の低輝度化を実現した。
- 広角でのシンボル誤り率を比較した結果、低輝度化に伴い発生する雑音の影響を受けにくい高輝度縮小セルがより低輝度化に適していると考えられる。
- ピクセル位置ごとの受信ピクセル値を比較した結果、高輝度縮小セルでは受信ピクセル値分布の中央値がより高く保たれているため、雑音の影響を受けにくいと考えられる。